

ISBN 978-602-5614-84-2



**BUKU
REFERENSI**

**PEMBENTUKAN DAN
PENGENDALIAN KERAK CALCIUM
CARBONATE DI DALAM PIPA
BERALIRAN LAMINAR**

SAMSUDI RAHARJO



ABSTRAK

PEMBENTUKAN DAN PENGENDALIAN KERAK CALCIUM CARBONATE DI DALAM PIPA BERALIRAN LAMINAR

Oleh :

Samsudi Rahardjo

Pembentukan dan pengendalian pengerakan pada sistem perpipaan di industry yang merupakan masalah serius dan untuk mencegah terjadinya penyumbatan, berkurangnya volume aliran pada pipa mesin mesin *heat exchanger* seperti boliler sehingga akan menambah biaya perawatan dan produksi, maka peneliti ingin menyelidiki cara-cara yang efektif dan efisien sebelum terjadi penyumbatan pada pipa atau pipa pecah. Tujuannya adalah untuk mempelajari proses pembentukan dan pengendalian kerak pada pipa yang dianalisis. Kerak adalah tumpukan keras dari bahan anorganik terutama pada permukaan perpindahan panas yang disebabkan oleh pengendapan partikel mineral dalam air yang biasa ditemui di industri minyak dan aliran cairan pada system industri lainnya. Kerak biasanya mengendap dan tumbuh pada peralatan industri, seperti pada sistem perpipaan adalah kalsium karbonat (CaCO_3), menyebabkan penyumbatan di dalam pipa sehingga memperbesar biaya operasional.

Larutan pembentuk kerak dibuat dengan mencampurkan larutan equimolar CaCl_2 , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 dengan konsentrasi (1500, 2000, 3000) ppm Ca^{++} mengalir secara laminar 30 mL/menit pada suhu : (30, 40, 50, 60°C). Parameter lain yang diamati pada percobaan ini yaitu penambahan aditif berupa asam sitrat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) dengan konsentrasi 8 ppm, 16 ppm dan 24 ppm yang diharapkan menghambat pertumbuhan kerak. Proses pertumbuhan kerak diketahui dengan mengukur nilai konduktivitas larutan yang keluar dari pipa uji tersebut serta karakterisasi (SEM, EDS, XRD) dari kerak yang terbentuk. Berdasarkan Hasil SEM, EDS dan XRD didapatkan perubahan morfologi dan fase kerak sehingga dapat digunakan sebagai acuan bahwa kerak yang terbentuk mudah untuk di removal

Pengendalian pengendapan kerak kalsium karbonat Pada Sistem Pipa beraliran laminar dengan penambahan asam sitrat. Dalam penelitian eksperimental, larutan pembentuk kerak dibuat dengan mencampur larutan ekimolar dari CaCl_2 dan Na_2CO_3 dengan konsentrasi 3.000 ppm Ca^{2+} . Larutannya mengalir dalam pipa laminar pada suhu: 30, 40, 50 dan 60°C. Parameter lain yang dipilih dalam penelitian ini adalah penambahan aditif: asam sitrat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) dengan konsentrasi 8 ppm, 16 ppm dan 24 ppm. Asam sitrat dipilih untuk menghambat pertumbuhan kerak (Rabizadeh, 2014). Pertumbuhan kerak terus-menerus diamati dengan mengukur konduktivitas larutan yang keluar dari pipa. Ditemukan bahwa dalam semua percobaan, konduktivitas menurun tiba-tiba setelah periode induksi tertentu. Suhu tinggi yang dihasilkan, semakin banyak massa kerak diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan suhu dipromosikan pembentukan kerak (Muryanto et al., 2012). Kerak terbentuk kemudian dievaluasi menggunakan SEM/EDX dan analisis XRD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerak memiliki morfologi rombohedral yang berbentuk kubus dan fase kristal kerak ditemukan sebagian besar adalah kalsit. Kehadiran asam sitrat tampaknya mengubah morfologi kristal.

Pemodelan dan optimasi CaCO_3 yang diendapkan dalam pipa beraliran laminar dan penambahan asam sitrat pada suhu tinggi. Kalsium karbonat adalah mineral yang umum ditemukan di beragam aplikasi industri dan teknologi dan telah menjadi subjek penelitian intensif (Muryato dkk., 2012). Pada penelitian ini, metodologi desain eksperimental

digunakan untuk mengoptimalkan kalsium karbonat yang diendapkan dalam pipa beraliran laminar. Variabel independen, yaitu suhu (50-60⁰C), konsentrasi Ca²⁺ (2000-3000 ppm), aditif asam sitrat (10-20 ppm) dan massa optimum dari endapan diperiksa menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) (Tang dkk., 2004; Steinberg dkk., 2010; Boyaci, 2005; Tantineni dkk., 2007; Wang dkk., 2008). Hasil optimum diusulkan untuk menjadi konsentrasi Ca²⁺ dari 3.425,23 ppm dan 3,2 ppm aditif asam sitrat. Dalam perhitungan ini, yang paling berpengaruh pada produksi massa endapan kerak adalah suhu. Produksi optimum adalah 540,127 mg, yang dapat dicapai pada suhu 68,409⁰C.

Secara keseluruhan penelitian ini menunjukkan bahwa kerak kalsium karbonat dan kalsium sulfat merupakan masalah serius di industri yang meningkatkan biaya pemeliharaan. Faktor-faktor yang menyebabkan pembentukan kerak dipelajari dalam penelitian ini antara lain konsentrasi Ca²⁺, dan suhu. Analisa menunjukkan semakin tinggi suhu, konsentrasi dan laju alir massa kerak yang terbentuk semakin banyak. Selain menganalisa faktor pembentukan kerak, dilakukan pula pengendalian kerak dengan menambahkan zat aditif. Penambahan asam sitrat terbukti dari hasil penelitian mampu menurunkan jumlah massa kerak. Hasil ini didukung dengan perubahan morfologi kristal dan fasa kerak dari uji SEM, EDX dan XRD akibat penambahan asam sitrat.

Kata Kunci : simulator, kerak, kalsium karbonat, zat aditif, optimal kerak.

ABSTRACT

FORMOATION AND CONTROL OF CALCIUM CARBONATE IN LAMINAR FLOW PIPE

By

Samsudi Rahardjo

The formation and control of the scaling on the piping system in the industry which is a serious problem and to prevent the occurrence of blockage, reduced flow volume in the pipeline on heat exchanger such us boiler so that it will increase the cost of maintenance and production, the researchers want to investigate the ways effective and efficient before the occurrence of blockage in pipes or pipes broken. The aim is to study the process of formation and control of the scale on the pipe being analyzed.

The scale is a hard pile of inorganic materials especially on the surface of heat transfer caused by the deposition of mineral particles in water commonly encountered in the oil industry and the fluid flow in other industrial systems. The scale usually precipitates and grows on industrial equipment, such as the piping system is calcium carbonate (CaCO_3), causing blockages in the pipeline to increase operational costs.

The cracking solution was prepared by mixing an equimolar solution of CaCl_2 , Na_2CO_3 with concentration (1500, 2000, 3000) ppm Ca^{2+} flowing laminar 30 mL / min at (30, 40, 50, 60°C). Other parameters observed in this experiment were the addition of additives in the form of citric acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) with concentration of 8 ppm, 16 ppm and 24 ppm which is expected to inhibit the growth of the scale. The scale growth process is known by measuring the conductivity value of the solution coming out of the test tube as well as the characterization (SEM, EDS, XRD) of the formed scale.

Control of precipitation of calcium carbonate scale on laminar pipe system with the addition of citric acid. In the experimental study, the scale forming solution was prepared by mixing the ecimolar solution of CaCl_2 and Na_2CO_3 with a concentration of 3,000 ppm Ca^{2+} . The solution flows in a laminar pipe at: 30, 40, 50 and 60°C. Other parameters chosen in this study were the addition of additives: citric acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) with concentration of 8 ppm, 16 ppm and 24 ppm. Citric acid is selected to inhibit the growth of the scale (Rabizadeh, 2014). The growth of the scale is continuously observed by measuring the conductivity of the solution coming out of the pipe. It was found that in all experiments, the conductivity decreased abruptly after a certain induction period. The higher temperatures produced, the more mass of the obtained scale indicates that the increase in temperature promoted the formation of the scale (Muryanto et al., 2012). The formed scale is then evaluated using SEM / EDX and XRD analysis. The results showed that the scale had rombohedral morphology in cubic shape and the crystalline phase of the scale was found to be mostly calcite. The presence of citric acid seems to change the morphology of crystals.

Modeling and optimization of CaCO_3 deposited in laminar flow pipes and the addition of citric acid at high temperatures. Calcium carbonate is a mineral commonly found in a variety of industrial and technological applications and has been the subject of intensive research (Muryato et al., 2012). In this study, experimental design methodologies were used to optimize the precipitated calcium carbonate in a laminar flow pipe. The independent variables, ie temperature (50-60°C), Ca^{2+} concentration (2000-3000 ppm), citric acid additives (10-20 ppm) and the optimum mass of the sediment were examined using Response Surface Method (RSM) (Tang et al., 2004; Steinberg dkk., 2010; Boyaci, 2005; Tantineni et al., 2007; Wang et al., 2008). The optimum results were proposed to be Ca^{2+} concentrations

of 3,425.23 ppm and 3.2 ppm of citric acid additives. In this calculation, the most influential on mass production of scale precipitation is temperature. The optimum production is 540,127 mg, which can be reached at 68,409⁰C.

Control of the calcium carbonate and calcium sulphate calcium deposits (CaCO₃-CaSO₄) by using citric acid in the laminar pipe. The scale forming solution is prepared here by mixing CaCl₂, CaCO₃ and Na₂SO₄ solutions, with a concentration of 3000 ppm Ca²⁺ in a laminar flowing tube at a temperature of 30, 40, 50 and a 60⁰C parameter. The additives selected in this study were citric acid (C₆H₈O₇) with a concentration of 8 ppm, 16 ppm and 24 ppm.

Overall this study shows that calcium carbonate and calcium sulfate scale are serious problems in the industry that increase maintenance costs. Factors that led to the formation of the scale studied in this study include Ca²⁺ concentration, temperature and flow rate. The analysis showed that the higher temperature, concentration and scaleal mass flow rate formed more and more. In addition to analyzing the factors of scale formation, also carried out the control of the scale by adding citric acid additives. The addition of citric acid is evident from the results of the study was able to reduce the amount of scale mass. These results are supported by changes in crystal morphology and scale phase from SEM, EDX and XRD tests due to the addition of citric acid.

Keywords : scale, simulator, calcium carbonate, additive, scale optimization

KATA PENGANTAR

Kerak merupakan penguasaan ilmu pengetahuan pada sistem pengaliran pipa industri, sehingga kecepatan alir fluida sangat berpengaruh. Fluida yang mengalir dalam pipa mempunyai uraian gaya aksial dan yang menyebabkan inti kerak terbentuk dan sebagian menempel pada dinding pipa bagian dalam, endapan kerak dapat menghambat aliran fluida dalam sistem industri, boros energi dan dapat mempercepat rusaknya pipa.

Dimulai dari berbagai penelitian tentang pergerakan dalam sistem pipa industri yang telah penulis lakukan dan telah diseminarkan melalui seminar nasional dan internasional serta dipublikasikan pada berbagai journal internasional terindeks scopus, maka dihasilkan buku yang dirangkum dari hasil penelitian dengan subyek **“PEMBENTUKAN DAN PENGENDALIAN KERAK CALCIUM CARBONATE DIDALAM PIPA BERALIRAN LAMINAR”**. Buku ini disusun untuk membantu praktisi dan peneliti yang tertarik dengan pergerakan dalam sistem pipa dalam berbagai aplikasi.

Uraian dan contoh-contoh dalam buku ini diutamakan pada percobaan-percobaan yang dapat diterapkan pada sistem aliran pada pipa, seperti pada sistem pemipaan limbah, pemanas, pendingin dan sebagainya. Pembentukan dan pertumbuhan kerak diawali dari ionisasi air dan berlanjut pada persenyawaan dan dilanjutkan dengan kelarutan rendah sehingga kerak terdeposisi pada permukaan dalam pipa. Faktor-faktor dan parameter yang mendukung pembentukan kerak diantaranya kandungan ion, kelarutan, komposisi, suhu, pH dan waktu kontak intermolekuler.

Melalui buku referensi ini penulis mengharapkan sambutan yang baik dari para pengamat, baik berupa saran tertulis maupun lisan. Semua tanggapan dan saran Insya Allah akan diterima dengan senang hati dan akan ditindaklanjuti.

Semarang,2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan dan Batasan Masalah.....	3
1.3 Originalitas Penelitian	3
1.4 Manfaat penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Definisi kerak	5
2.2 Pembentukan kerak.....	6
2.3 Jenis kerak dan faktor yang mempengaruhi pembentukannya	8
2.4 Kerak kalsium karbonat	11
2.4.1. Pengaruh CO ₂	11
2.5. Pengaruh temperatur terhadap pembentukan kerak.....	12
2.6. Pengaruh pH larutan	15
2.7. Pengaruh laju alir terhadap pembentukan kerak.....	15
2.8. Waktu induksi.....	17
2.9. Penambahan aditif	18
2.10. Morfologi kalsium karbonat	19
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1. Bahan Penelitian	22
3.2. Alat Penelitian	22
3.3. Diagram Alir Penelitian.....	25
3.4 Langkah Penelitian Penutup	26
3.4.1. Alat Eksperimen Pembentukan kerak.....	26
3.4.2. Pengujian Alat	27
3.5 Pengujian laju alir.....	28
3.5.1.Pembuatan Larutan CaCl ₂ , Na ₂ CO ₃ dan Asam Tartrat (C ₄ H ₆ O ₆) Sebagai Aditif	28
3.6 Persiapan Pipa Uji	32
3.7 Pengambilan Data Penutup.....	33
3.8 Pengujian SEM, Microanalyzer (EDX) dan XRD Penutup.....	34
BAB 4. PEMBENTUKAN DAN PENGENDALIAN KERAK CaCO ₃ DALAM PIPA BERALIRAN LAMINAR	35
4.1 Pengaruh Suhu terhadap Massa Kerak Kalsium Karbonat.....	35
4.2 Pengaruh Aditif Asam Sitrat terhadap Pembentukan Kerak CaCO ₃	36
4.3 Penentuan Waktu Induksi Selama Presipitasi Calcium Carbonat	37
4.4 Permodelan dan Optimasi Variabel Kerak CaCO ₃	38
4.5 Nilai Validasi Prediksi pada Variabel Optimal	41
4.6 Hasil Mikrostruktur Deposit Kalsium Karbonat.....	42
4.6.1 Analisa Hasil Scanning Electron Microscopy (SEM)	42
4.6.2 Hasil Energy Disperse X-ray (EDX) Penutup.....	44

4.6.3 Hasil X-Ray Diffractiometer (XRD) CaCO ₃	47
BAB 5. ANALISA KINETIK NON-ISOTHERMAL KRISTAL CaCO₃	
DALAM PIPA BERALIRAN LAMINAR	50
5.1 Teori Gaya Kinetika	50
5.2 Analisa Energi aktivasi dari hasil uji Differential Scanning Calorimeter (DSC).....	52
5.3 Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) Method.....	54
5.4 Flynn-Wall-Ozawa (FWO) Method	55
5.5 Tang Method.....	56
5.6 Straink Method	56
BAB 6 PENUTUP	59
6.1 Kesimpulan	59
6.2 Implikasi Hasil Penelitian.....	59
6.3 Saran-saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengerakan kerak mineral tidak hanya fenomena kristalisasi yang terbentuk dalam proses alami (*biomineralization*), tetapi merupakan masalah yang sering ditemui dalam berbagai kegiatan industri (Setta dan Neville, 2014). Hal ini disebabkan karena terdapatnya unsur-unsur pembentuk kerak seperti alkalin, kalsium, klorid, sulfat dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada keadaan kesetimbangan. Kerak biasanya mengendap dan tumbuh pada peralatan industri seperti *cooling tower, heat exchangers, pipe, casing manifold, tank* dan peralatan industri lainnya. Kerak merupakan suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi (Kiaei dan Haghtalab, 2014).

Potensi kerak yang disebabkan oleh garam mineral dimiliki hampir semua jenis sumber air di dunia seperti air tanah, air payau, air laut serta air limbah. Mineral membentuk padatan atau deposit yang sangat kuat menempel pada permukaan material. Sejauh ini kerak mineral merupakan penyebab kerak pada beberapa sistem seperti instalasi *cooling water* (Tzotzi dkk, 2007).

Penyebab terjadi kerak di dalam pipa akan mengurangi diameter serta menghambat aliran fluida pada sistem pipa tersebut, sehingga menimbulkan masalah terhambatnya aliran fluida. Terganggunya aliran fluida tersebut menyebabkan tekanan semakin tinggi, sehingga pipa mengalami kerusakan (Asnawati, 2001). Pembentukan kerak dapat dicegah dengan cara pelunakan dan pembebasan mineral air, akan tetapi penggunaan air bebas mineral dalam industri-industri besar membutuhkan biaya yang lebih tinggi (Sousa dan Bertran, 2014).

Metode mengatasi pembentukan kerak di industri minyak dan gas biasanya dengan menerapkan bahan kimia yang dikenal sebagai *inhibitor* untuk mengontrol pertumbuhan kristalisasi dengan tujuan, mengurangi, mencegah atau menunda, pembentukan kerak. Biasanya formulasi ini mengandung fosfonat dan karboksilat senyawa atau *polymerspolyacrylate* yang disebut sebagai *anti-scalants*. Inhibitor

biasanya diinjeksikan kedalam larutan yang secara kontinyu maupun periodik metode ini mampu mengendalikan proses *nucleation*, pertumbuhan kristal kerak yang terjadi pada permukaan pipa dan peralatan lainnya (Sousa dan Bertran, 2014).

Kerak juga dapat dicegah menggunakan aditif asam sebagai *inhibitor* untuk menurunkan pH larutan, mengontrol *impurity* ion senyawa anorganik serta komposisi morfologi dan fase kristal dan mencegah proses *nucleation*, pertumbuhan kristal namun menghilangkan kerak menggunakan asam dengan konsentrasi tinggi tidak efektif karena dapat meningkatnya laju korosi yang cukup tinggi (Wang dkk, 2010). Hal-hal inilah yang mendasari untuk dilakukan suatu penelitian lebih lanjut mengenai inhibitor kerak baru yang lebih efektif dan ramah lingkungan yaitu dengan inhibithor asam tartrat.

Peningkatan laju aliran akan memperpendek periode induksi karena meningkatkan frekuensi pertumbuhan molekul dalam larutan. Tingkat pertumbuhan kristal ditentukan oleh kemampuan difusi zat terlarut ke permukaan kristal dan kemampuan pengendapan zat terlarut di permukaan. Kekuatan yang memudahkan difusi zat terlarut adalah perbedaan konsentrasi zat terlarut antara permukaan kristal dan larutan. Faktor yang perlu diperhatikan dalam laju difusi zat terlarut adalah laju alir. Laju aliran air dan pH-perlakuan pada perangkat magnet memiliki dampak penting pada jenis nukleasi dan jumlah mineral yang diendapkan pada akhir uji pengerakan. Laju aliran dan pH-perlakuan sekaligus laju pengendapan yang semakin tinggi, memperbanyak nukleasi yang terjadi dalam larutan (Alimi dkk, 2007).

Hisyam (2013) menyatakan bahwa dengan meningkatnya laju aliran menyebabkan waktu induksi lebih cepat. Hal tersebut karena selain membawa komponen kerak lebih banyak dalam fluida, laju alir yang tinggi menyebabkan ion bergerak lebih cepat yang berdampak semakin cepat pula reaksi yang terjadi antar ion. Mao dan Huang (2007) mengatakan bahwa dengan konsentrasi asam malat akan mempengaruhi terbentuknya morfologi dan ukuran kristal. Mereka menggunakan asam malat sebagai aditif dengan konsentrasi 0 sampai 40 mM. Dalam penelitiannya, kristal CaCO_3 di dapat dengan mengendapkankalsium klorid dan penambahan urea dalam bak penampung pada temperatur 90°C . Konsentrasi CaCl_2 dan urea masing-masing 0.1 dan 0.6 M, dengan ph awal dari 7 hingga 11.5,

dan konsentrasi asam malat dari 0 hingga 40 mM, serta waktu pengendapan dari 1 hingga 12 jam (Mao dan Huang., 2007).

Oleh karena itu, pada penelitian ini menggunakan asam tartarat sebagai *inhibitor* dengan parameter variasi laju alir diharapkan mampu menghambat laju pertumbuhan kerak mineral yang terbentuk di dalam pipa-pipa industri. Penelitian ini juga mempelajari pengaruh penambahan asam tartarat, mengetahui perubahan ukuran morfologi kristal dan pertumbuhan massa kerak.

1.2. Perumusan dan Batasan Masalah

Pengerakan mineral sangat merugikan dalam proses produksi sehingga harus dilakukan usaha untuk menghambat pembentukannya dengan cara mengatur parameter proses yang mempengaruhi pertumbuhannya, diantaranya adalah laju alir. Selain itu langkah untuk menghambat pertumbuhan kerak mineral ditambahkan aditif ke dalam larutan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana proses pembentukan kerak dalam pipa dapat dihambat dengan memvariasikan laju aliran (25, 35, 45 ml/menit) dan konsentrasi aditif berupa asam tartrat (4, 6,10 ppm).

1.3. Originalitas Penelitian

Penelitian tentang pembentukan mineral dan pengendalian pertumbuhan kerak dengan menggunakan *inbithor* asam sebagai *anti scaling* suda banyak di lakukan. Berikut ini beberapa penelitian tentang pembentukan kerak mineral yang telah dilakukan diantaranya adalah :

1. Tang dan kawan – kawan melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan asam sulfat dan asam fosfonat, hasil penelitiannya membuktikan bahwa dengan penambahan asam sulfat 10 ppm dan asam fosnat 10 ppm pada larutan CaCl_2 , NaHCO_3 , Na_2SO_4 akan mengurangi tingkat nukleasi dan pertumbuhan kristal. (Tang dkk, 2012).
2. Tijing dan kawan - kawan melakukan penelitian tentang pengaruh frekuensi tegangan listrik (HFEF) terhadap pembentukan kerak mineral (CaCO_3) pada permukaan tabung tembaga yang dipanaskan. Dalam penelitian ini, rasio serbuk NaHCO_3 untuk CaCl_2 ditemukan menjadi 1,52 untuk mendapatkan kesadahan air yang diinginkan 350 sampai 550 mg / L yang dilarutkan ke dalam air suling

0,150 m³. Penelitian dilakukan dengan membandingkan antara tanpa menggunakan pengaruh HFEF dan menggunakan HFEF (Tijing dkk, 2011).

3. Muryanto dan kawan-kawan melakukan penelitian mengenai pengaruh dari penggunaan tiga aditif yang berbeda (Fe²⁺, Cu²⁺, dan Zn²⁺) pada laju pergerakan dan morfologi kerak dengan laju alir 30, 40, dan 50 ml/menit (Muryanto dkk, 2012).

4. Muryanto dan kawan – kawan melakukan penelitian tentang pembentukan kerak mineral di dalam pipa dengan variasi laju alir 30,40,50 ml/menit, pengaruh temperatur dan penggunaan asam malat 3 dan 5 ppm (Muryanto dkk, 2014).

Dengan menggunakan alat penelitian sebelumnya yang melakukan pengujian kerak mineral, penulis ingin mengetahui pengaruh variasi laju alir dan penambahan zat aditif berupa aditif asam tartarat terhadap pergerakan.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian eksperimental yang hasilnya berupa data empirik tentang fenomena pembentukan kerak proses pencegahan terbetuknya kerak dengan menambahkan aditif. Maka dari itu diharapkan akan memberikan manfaat pada umumnya bagi pengkajian dan pengembangan ilmu tentang kerak pada aspek proses pembentukan dan pencegahannya baik kerak dilingkungan sehari-hari maupun kerak yang muncul dalam industri, khususnya bagi para operator industri yang terkait dengan bidang kerak (seperti boiler, cooling tower dan heat exchanger) bisa mendapatkan tambahan sumber informasi dalam menjalankan tugasnya. Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan bisa memberikan suatu data atau informasi bagaimana cara pengaturan parameter yang berpengaruh terhadap pertumbuhan kerak sehingga sistem kerja akan mempunyai efisiensi yang lebih tinggi. Proses aliran bisa berjalan tanpa ada gangguan dari kerak yang timbul, proses heat transfer tidak terhambat oleh kerak yang menempel pada dinding bejana.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Definisi Kerak

Kerak merupakan endapan yang terbentuk dari proses kristalisasi dan pengendapan mineral yang terkandung dalam suatu zat. Pembentukan kerak biasanya terjadi di bidang-bidang yang bersentuhan secara langsung dengan suatu fluida selama proses produksi, seperti alat penukar panas (*heat exchangers*), rangkaian pompa dalam sumur (*downhole pump*), pipa produksi, pipa selubung, pipa alir, serta peralatan produksi lainnya (Crabtree dkk,1990).

Adanya endapan kerak pada komponen-komponen tersebut diatas, dapat menghambat aliran fluida baik dalam pipa maupun alat *heat exchangers*. Pada *heat exchangers*, endapan kerak akan mengganggu transfer panas sehingga menyebabkan panas akan semakin meningkat. Sedangkan pada pipa-pipa, hambatan aliran terjadi karena adanya penyempitan volume alir fluida serta penambahan kekasaran permukaan pipa bagian dalam, seperti yang terlihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1.Endapan kerak kalsium karbonat dalam Pipa

2.2. Pembentukan kerak

Faktor utama berpengaruh terhadap pembentukan, pertumbuhan kristal serta pengendapan kerak antara lain adalah perubahan kondisi reservoir penurunan tekanan reservoir dan perubahan temperatur, pencampuran dua jenis air yang mempunyai susunan mineral tidak sesuai, adanya supersaturasi, penguapan akibat dari perubahan konsentrasi, pengadukan (agitasi, pengaruh dari turbulensi), waktu kontak antara padatan dengan permukaan media pengendapan serta perubahan pH air (Antony dkk, 2011).

Mekanisme pembentukan endapan kerak berkaitan erat dengan komposisi air di dalam formasi. Secara umum, air mengandung ion-ion terlarut, baik itu berupa kation (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} dan Fe^{3+}), maupun anion (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} dan CO_3^{2-}). Kation dan anion yang terlarut dalam air akan membentuk senyawa yang mengakibatkan terjadinya proses kelarutan. Kelarutan didefinisikan sebagai batas suatu zat yang dapat dilarutkan dalam zat pelarut pada kondisi fisik tertentu. Proses terlarutnya ion-ion dalam air formasi merupakan fungsi dari tekanan, temperatur serta waktu kontak antara air dengan media pembentukan (Ratna, 2011).

Proses terlarutnya ion-ion dalam air formasi merupakan fungsi dari tekanan, temperatur serta waktu kontak (*contact time*) antara air dengan media pembentukan. Air mempunyai batas kemampuan dalam menjaga senyawa ion-ion tersebut tetap dalam larutan, sehingga pada kondisitekanan dan temperatur tertentu, dimana harga kelarutan terlampaui, maka senyawa tersebut tidak akan terlarut lagi, melainkan terpisah dari pelarutnya dalam bentuk padatan (Ratna, 2011).

Dalam proses produksi, perubahan kelarutan terjadi seiring dengan penurunan tekanan dan perubahan temperatur selama produksi. Perubahan angka kelarutan pada tiap zat terlarut dalam air formasi akan menyebabkan terganggunya keseimbangan dalam air formasi, sehingga akan terjadi reaksi kimia antara ion positif (kation) dan ion negatif (anion) dengan membentuk senyawa endapan yang berupa kristal (Ratna, 2011).

Dari penjelasan diatas, faktor yang mendukung pembentukan dan pengendapan kerak antara lain adalah sebagai berikut :

- Air mengandung ion-ion yang memiliki kecenderungan untuk membentuk senyawa-senyawa yang mempunyai angka kelarutan rendah.
- Adanya perubahan kondisi fisik atau komposisi air yang akan menurunkan kelarutan lebih rendah dari konsentrasi yang ada.
- Kenaikan temperatur akan menyebabkan terjadinya proses penguapan, sehingga akan terjadi perubahan kelarutan.
- Air formasi yang mempunyai derajat keasaman (pH) besar akan mempercepat terbentuknya endapan kerak.
- Pengendapan kerak akan meningkat dengan lamanya waktu kontak dan ini akan mengarah pada pembentukan kerak yang lebih padat dan keras.

Proses pembentukan kristal CaCO_3 dapat dikategorikan dalam tiga tahapan pokok, yaitu :

1. Tahap Pembentukan Inti (nukleasi)

Pada tahap ini ion-ion yang terkandung dalam suatu fluida akan mengalami reaksi kimia untuk membentuk inti kristal. Inti kristal yang terbentuk sangat halus sehingga tidak akan mengendap dalam proses aliran.

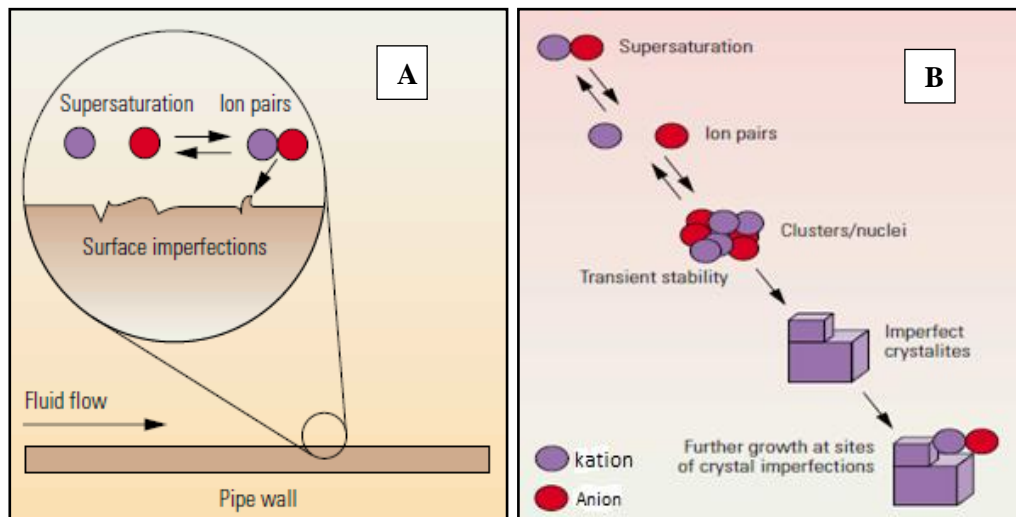
2. Tahap Pertumbuhan Inti

Pada tahap pertumbuhan inti kristal akan menarik molekul-molekul yang lain, sehingga inti akan tumbuh menjadi butiran yang lebih besar, dengan diameter 0,001 – 0,1 μ (ukuran koloid), kemudian tumbuh lagi sampai diameter 0,1 – 10 μ (kristal halus). Kristal akan mulai mengendap saat pertumbuhannya mencapai diameter > 10 μ (kristal kasar).

3. Tahap Pengendapan

Kecepatan pertumbuhan kristal dipengaruhi oleh ukuran dan berat jenis kristal yang membesar pada tahap sebelumnya. Selain itu proses pembentukan juga dipengaruhi oleh aliran fluida pembawa, dimana kristal akan mengendap apabila kecepatan pengendapan lebih besar dari kecepatan aliran fluida (Siswoyo dan Erna, 2005).

Sedangkan berdasarkan metode pembentukannya, pembentukan kristal dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu secara homogen (*homogeneous nucleation*) dan heterogen (*heterogeneous nucleation*) 9), seperti yang terlihat pada **Gambar 2.2**



Gambar 2.2. Pertumbuhan dan pengendapan kerak (a) Homogeneous nucleation (b) Heterogeneous nucleation (Crabtree dkk, 1990).

2.3. Jenis Kerak Dan Faktor yang Mempengaruhi Pembentukannya

Ion yang berbentuk padatan dan mempunyai kecenderungan untuk membentuk endapan kerak antara lain adalah kalsium karbonat (CaCO_3), gipsum atau kalsium sulfat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), dan barium sulfat (BaSO_4). Endapan kerak yang lain adalah strontium sulfat (SrSO_4) yang mempunyai intensitas pembentukan rendah dan kalsium sulfat (CaSO_4), yang biasa terbentuk pada peralatan pemanas, yaitu *boilers* dan *heater traters*, serta kerak dengan komponen besi, seperti *iron carbonate* (FeCO_3), *iron sulfide* (FeS) dan *iron oxide* (Fe_2O_3), seperti yang terlihat pada **Tabel 2.1** (Ratna, 2011).

Kerak dapat dikenali dengan mengklasifikasikannya berdasarkan komposisi yang membentuk kerak dan jenis pengendapannya. Berdasarkan komposisinya, cara umum kerak dibedakan menjadi kerak karbonat, kerak sulfat, serta campuran dari keduanya. Sedangkan berdasarkan jenis

pengendapannya, klasifikasi kerak dapat dilihat pada **Tabel 2.2**(Siswoyo dan Erna, 2005)

Tabel 2.1. Jenis komponen endapan kerak.

Chemical name	Chemical formula	Mineral name
Water soluble scale Natrium chloride	NaCl	Halite
Acid soluble scale Calcium carbonate Iron carbonate Iron sulfide Iron oxide Iron oxide Magnesium hydroxide	CaCO ₃ FeCO ₃ FeS ₇ Fe ₂ O ₃ Fe ₂ O ₄ Mg(OH) ₂	Calcite Siderite Trolite Hematite Magnetit Brucite
Acid insoluble scale Calcium sulfate Calcium sulfate	CaSO ₄ Caso ₄	Anhydrate Gypsum

Tabel 2.2. Klafikasi pengedapan kerak

Jenis	Sifat Utama	Komponen	Reaksi kimia
Hard scale	Umunya berwarna terang, dan apabila terdapat pengotor (minyak atau oksida besi) akan menjadi agak gelap. Hampir tidak larut dalam asam	BaSO ₄ , SrSO ₄ , CaSO ₄ , dan 2H ₂ O	BaCl ₂ + Na SO ₄ →BaSO ₄ ↓+2H ₂ O SrCl ₂ + CaSO ₄ → SrSO ₄ ↓ CaCl ₂
Soft scale	Umunya terang atau agak gelap (jika mengandung pengotor) larutan dalam asam mengandung CO ₂	CaCO ₃ dengan kandungan MgCO ₃ FeCO ₃	Ca (HCO ₃) ₂ →CaCO ₃ ↓+ CO ₃ + H ₂ O

		SiO ₂ CaSO ₄ 2H ₂ O FeS dan S	
Misc	Tidak mudah larut dalam asam mengandung H ₂ S berwarna coklat tua sampai hitam	feS, Fe ₂ O ₃ ,H ₂ O,S	Fe + H ₂ S → FeS↓ + HFe ₂ O ₃ + 3H ₂ S → 2FeS↓

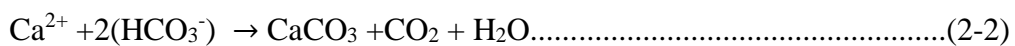
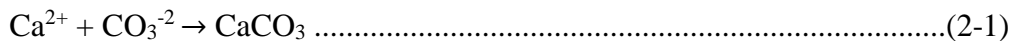
Dari sekian banyak jenis kerak yang dapat terbentuk, hanya sebagian kecil yang seringkali dijumpai pada industri perminyakan. **Tabel 2.3** menunjukkan jenis-jenis kerak yang umum terdapat di lapangan.

Tabel 2.3. Endapan kerak yang umum terdapat di ladang minyak

Jenis kerak	Rumus kimia	Faktor yang berpengaruh
Kalsium karbonat (kalsit)	CaCO ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Penurunan tekanan • Perubahan temperatur • Kandungan garam terlarut • Perubahan keasaman (pH)
Kalsium sulfat Gypsum (sering hemi-Hydrate anhydrite)	CaSO ₄ . 2H ₂ O CaSO ₄ . 1/2H ₂ O CaSO ₄	<ul style="list-style-type: none"> • Perubahan tekan dan temperatur • Kandungan garam terlarut
Barium sulfat Strontium sulfat	BaSO ₄ SrSO ₄	<ul style="list-style-type: none"> • Perubahan tekan dan temperatur • Kandungan garam terlarut
Komponen besi Besi karbonat Sulfide besi Ferrous hydroxide Ferric hydroxide	FeCO ₃ FeS Fe(OH) ₂ Fe(OH) ₂ Fe ₂ O ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Korosi • Kandungan gas terlarut • Derajat keasaman (pH)

2.4. Kerak kalsium karbonat

Kerak kalsium karbonat merupakan endapan senyawa CaCO_3 (kalsit) yang terbentuk dari hasil reaksi antara ion kalsium (Ca^{2+}) dengan ion karbonat (CO_3^{-2}) ataupun dengan ion bikarbonat (HCO_3^-), dengan reaksi pembentukan sebagai berikut :



Faktor ataupun kondisi yang mempengaruhi pembentukan kerak kalsium karbonat antara lain adalah perubahan kondisi reservoir (tekanan dan temperatur), alkalinitas air, serta kandungan garam terlarut, dimana kecenderungan terbentuknya kerak kalsium karbonat akan meningkat dengan :

- meningkatnya temperatur
- penurunan tekanan parsial CO_2
- peningkatan pH
- laju alir
- penurunan kandungan gas terlarut secara keseluruhan

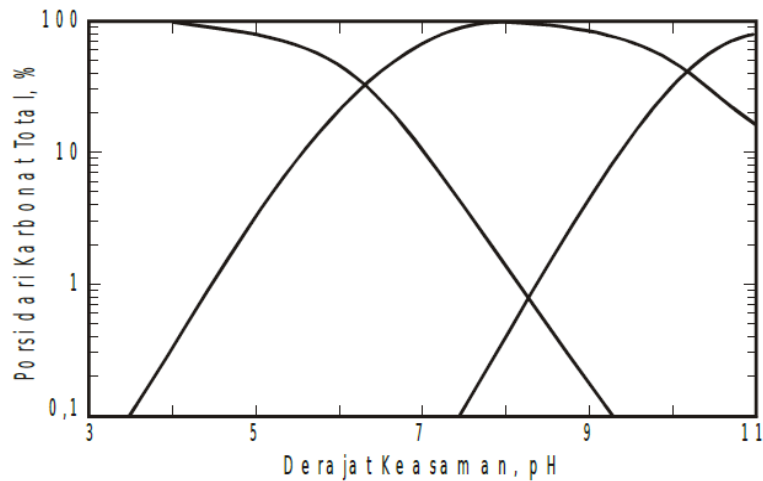
Selain hal-hal yang telah disebutkan diatas, turbulensi aliran dan lamanya waktu kontak (*contact time*) juga berpengaruh terhadap kecepatan pengendapan dan tingkat kekerasan kristal yang terbentuk (Antony dkk, 2011).

2.4.1. Pengaruh CO_2

Keberadaan CO_2 dalam air akan meningkatkan kelarutan CaCO_3 dalam air. Pada waktu CO_2 terlarut dalam air, senyawa tersebut akan membentuk asam karbonat, dengan reaksi ionisasi sebagai berikut :

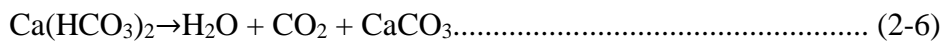


Prosentase ionisasi asam karbonat dalam pembentukan ion H^+ dan CO_3^{2-} pada berbagai harga pH dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3. Ionisasi asam karbonat pada berbagai harga pH (Siswoyo dan Erna, 2005).

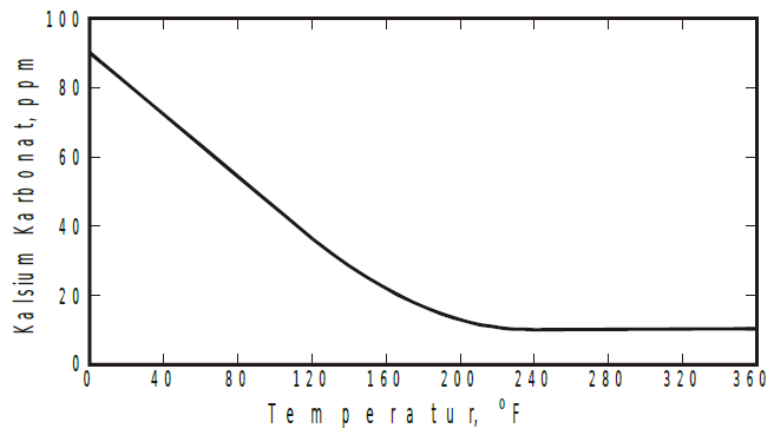
Pengaruh lain CO₂ adalah meningkatnya tekanan dalam sistem, yang besarnya dipengaruhi oleh tekanan parsial CO₂. Besarnya tekanan parsial CO₂ sendiri sebanding dengan fraksi mol CO₂ dalam gas dikalikan dengan tekanan total dalam sistem. Apabila terdapat perubahan tekanan dalam sistem maka jumlah CO₂ yang larut dalam air akan semakin banyak, sesuai dengan reaksi pada (2.15), sebagai berikut :



Apabila konsentrasi CO₂ dalam larutan bertambah, maka reaksi diatas akan bergeser ke kiri dan air akan menjadi lebih asam (pH turun) serta pembentukan CaCO₃ akan berkurang. Sedangkan apabila tekanan dalam sistem turun, maka CO₂ akan terbebaskan dari larutan. Pada kondisi yang demikian, tekanan parsial CO₂ akan berkurang, sehingga reaksi akan bergeser ke arah kanan, yang menyebabkan pH air akan meningkat dan terjadi pengendapan CaCO₃ (Siswoyo dan Erna, 2005).

2.5. Pengaruh temperatur terhadap pembentukan kerak

Kelarutan kalsium karbonat akan semakin berkurang dengan bertambahnya temperatur, sehingga semakin besar temperatur air maka tingkat kecenderungan terbentuknya kerak CaCO_3 akan semakin besar. Pengaruh tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Siswoyo dan Erna, 2005).

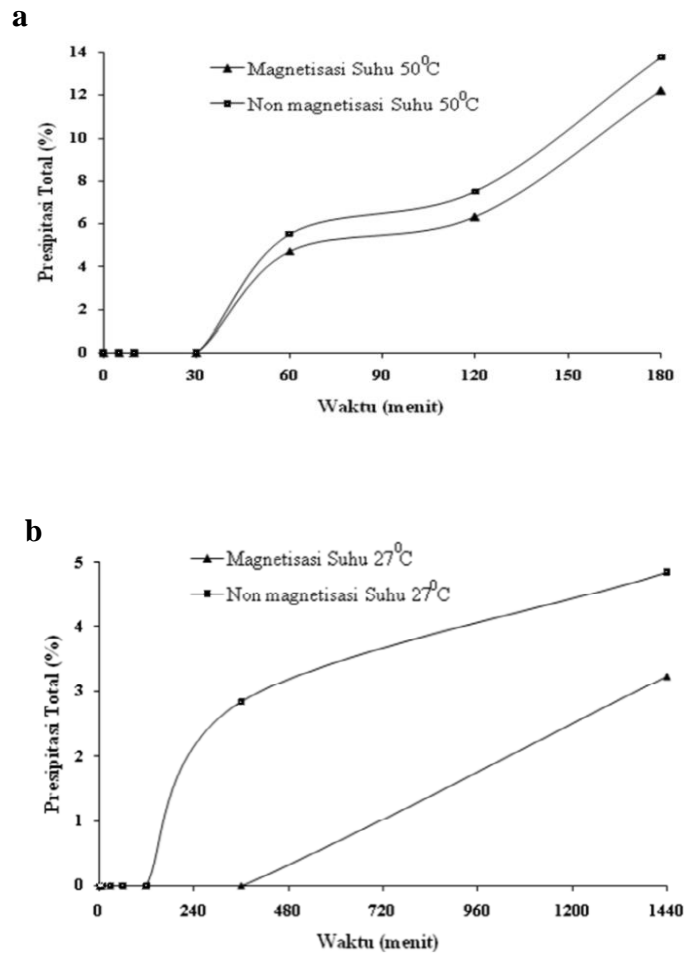


Gambar 2.4. Pengaruh temperatur terhadap kelarutan kalsium karbonat(Siswoyo dan Erna, 2005).

Pengaruh tersebut dapat terjadi karena kenaikan temperatur air akan menyebabkan adanya penguapan sehingga jumlah dalam air akan berkurang, sehingga berdasarkan reaksi pada (2-5) maka reaksi akan bergeser ke arah kanan dan *scale* kalsium karbonat akan terbentuk (Siswoyo dan Erna,2005).

Fenomena ini dapat digunakan untuk menjelaskan terbentuknya kerak pada formasi sumur-sumur injeksi yang mempunyai tekanan dasar sumur yang cukup tinggi, serta kerak yang terjadi pada dinding tabung alat pemanas.

Gambar 2.4 merupakan hasil penelitian yang menunjukkan pengaruh suhu terhadap kristalisasi CaCO_3 . Pada sampel non-magnetisasi dengan suhu 27°C terlihat bahwa proses presipitasi baru berlangsung di atas 250 menit pertama, sedangkan ketika suhu dinaikkan menjadi 50°C presipitasi mulai terjadi di atas 30 menit pertama. Proses presipitasi terjadi sekitar 220 menit lebih awal pada suhu 50°C . Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan suhu akan mempercepat proses presipitasi.



Gambar 2.5. Pengaruh suhu terhadap proses kristalisasi CaCO_3 pada sampel nonmagnetisasi (a) $T= 27^\circ\text{C}$ (b) $T= 50^\circ\text{C}$ (Saksono, 2006)

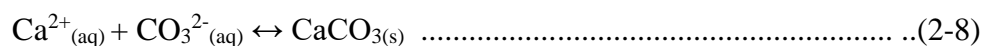
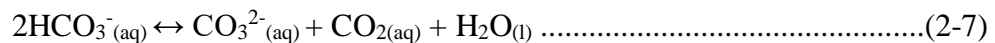
Fenomena tersebut terjadi dikarenakan keunikan CaCO_3 , dimana tidak seperti zat lain, kelarutan CaCO_3 akan berkurang seiring dengan kenaikan suhu. Secara spesifik variasi suhu $30^\circ\text{-}50^\circ\text{C}$ berpengaruh pada kinetika kristalisasi dan peningkatan kristalisasi homogen (Amor dkk, 2004).

2.6. Pengaruh pH larutan

Seperti telah dijelaskan diatas, kandungan CO_2 dalam air akan berpengaruh terhadap pH air dan kadar kelarutan CaCO_3 . Apabila pH air

meningkat, maka semakin besar pula kecenderungan terbentuknya kerakkalsium karbonat, demikian juga sebaliknya, semakin rendah harga pH air, kecenderungan tersebut akan semakin kecil.

Pada skala laboratorium, umumnya mekanisme pengendapan CaCO_3 di alam dapat didekati dengan tiga model larutan. Pertama, model larutan *calco-carbonic* yang diperoleh dengan cara melarutkan CaCO_3 bubuk dalam air dan mengalirkan gelembung gas CO_2 ke dalamnya. Larutan CaCO_3 yang dihasilkan bersifat asam (pH : 5,5 – 6,5) dan akan meningkat mendekati pH iso-elektrik kalsit yaitu sekitar 8,4 seiring dengan meningkatnya kejenuhan larutan CaCO_3 . Dengan naiknya pH, maka akan terjadi suatu reaksi kesetimbangan pembentukan CaCO_3 . Reaksi kesetimbangan presipitasi CaCO_3 dari model larutan CaCO_3 dapat ditulis sebagai berikut (Saksono, 2006) :



2.7. Pengaruh laju alir terhadap pembentukan kerak

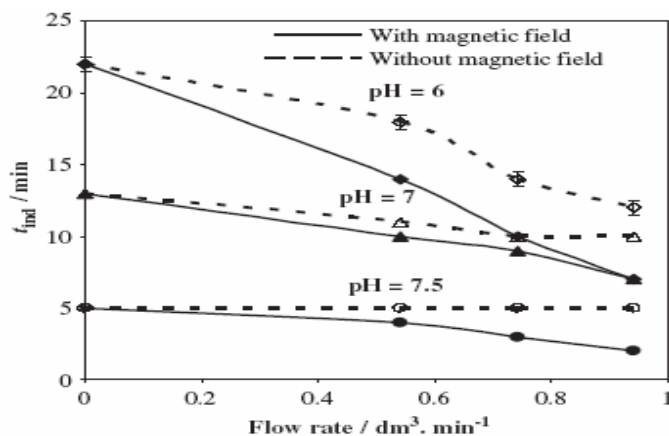
Laju alir juga berpengaruh terhadap pertumbuhan kerak dan jumlah kerak yang dihasilkan, semakin lambat laju alir maka semakin cepat pertumbuhan kerak dan semakin banyak pula jumlah kerak yang dihasilkan begitu pula sebaliknya, hal ini dapat dilihat pada penelitian Bansal dan Muller, 1993; Bansal dkk, 1997).

Mereka melakukan penelitian mengenai gypsum pada alat penukar panas menunjukkan bahwa laju pergerakan turun dengan meningkatnya laju alir, hal ini disebabkan oleh tegangan geser aliran fluida yang melemahkan dan melepaskan kerak dari permukaan alat penukar panas. Namun, pengendapan kerak juga bergantung pada beberapa parameter lain seperti karakteristik kerak, aliran larutan dan material dimana kerak tumbuh

(Bott,1995). Aging mungkin dapat melemahkan endapan kerak, sehingga massa kerak mungkin meningkat bersama dengan peningkatan laju alir pada awal pembentukan kerak, namun turun seiring dengan berjalannya waktu(Andritsos dan Karabelas, 1992).

Gracia dkk (2001) mengemukakan fakta bahwa pada laju aliran yang rendah, inhibitor kerak kurang efektif. Pada penelitiannya terungkap bahwa pada tingginya laju alir berperan penting dalam proses pergerakan yang dipercepat secara elektrokimia. Pada aliran laminar terlihat bahwa laju pergerakan meningkat bersama dengan laju alir. Ditemukan juga bahwa efisiensi inhibisi yang lebih tinggi pada daerah turbulen menandakan bahwa aliran turbulen mungkin meningkatkan kesulitan pertumbuhan kristal normal ketika terdapat inhibitor CaCO_3 (Gracia dkk,2001).

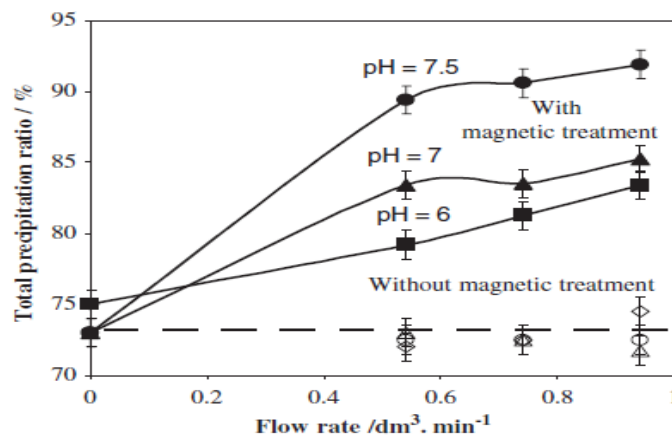
Gambar 2.4 menunjukkan adanya penurunan waktu induksi dengan bertambahnya laju alir. Magnetisasi mempercepat waktu induksi terutama pada pH rendah dan laju alir tinggi (Fathi dkk, 2006).



Gambar 2.6. Waktu induksi t_{ind} vs laju alir pada pH awal yang berbeda(Fathi dkk, 2006).

Penurunan waktu induksi ini menunjukkan magnetisasi larutan dengan sistem dinamis mendorong terjadinya peningkatan laju nukleasi CaCO_3 . Presipitasi total CaCO_3 dapat diukur dengan melihat penurunan jumlah ion Ca^{2+} dilarutan. (Fathi dkk,2006) mengatakan bahwa proses

magnetisasi meningkatkan presipitasi total CaCO_3 . Gambar 2.5 menunjukkan semakin tinggi pH awal dan kecepatan larutan maka akan semakin tinggi pula pengendapan kerak CaCO_3 (Fathi dkk, 2006)



Gambar 2.7. Rasio pengendapan total CaCO_3 pada berbagai laju alir dan pH awal larutan untuk waktu pengendapan 90 menit dan konsentrasi ion Ca^{2+} mula - mula 200 ppm (Fathi dkk, 2006)

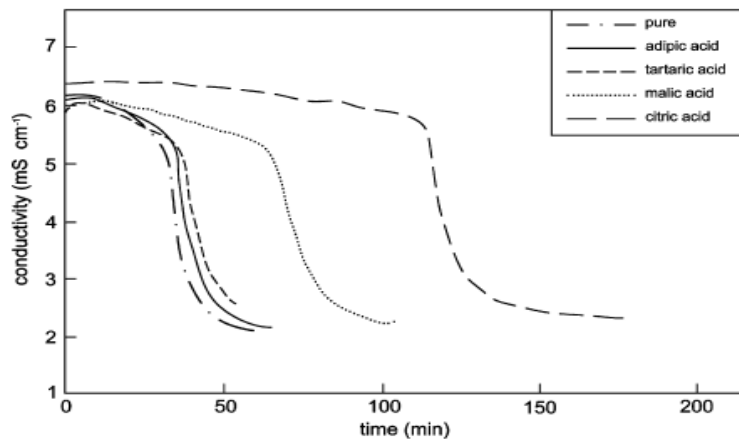
2.8. Waktu induksi

Waktu induksi adalah waktu yang dibutuhkan oleh ion dalam larutan untuk bereaksi sehingga membentuk inti kristal yang pertama kali (isopecus dkk, 2009). Semakin kecil waktu induksi berarti semakin cepat inti kristal terbentuk, sebaliknya bila semakin besar berarti semakin lama inti kristal terbentuk. Inti kristal selanjutnya menjadi pusat-pusat pertumbuhan kerak sehingga semakin banyak inti yang terjadi akan semakin banyak jumlah kerak yang terbentuk. Ini berarti bahwa bila waktu induksi kecil maka jumlah kerak yang terbentuk akan semakin banyak (Ma'mun dkk, 2013)

Untuk mendapatkan waktu induksi digunakan pendekatan tertentu agar mudah untuk diamati. Pada umumnya waktu induksi didekati dengan melihat nilai konduktivitas larutan dimana bila terjadi penurunan nilai konduktivitas yang signifikan maka hal ini memberikan isyarat bahwa ion-ion mulai

bereaksi membentuk inti kristal. Dari grafik didapatkan waktu induksi yaitu ditandai dengan perubahan garis yang signifikan (Sediono dkk,2011).

Sebelum terjadi pengintian garis mempunyai kecenderungan mendatar, setelah terjadi pengintian maka garis akan menurun cukup tajam. Singh dan Middendorf (2007) dalam pengkajiannya menyajikan sebuah diagram tentang hubungan antara konduktivitas dan waktu sebagai berikut :



Gambar 2.8 Waktu induksi tanpa aditif dan dengan penambahan beberapa aditif terhadap pembentukan kerak gipsium (Singh, N, B. Middendorf, 2007)

2.9. Penambahan aditif

Penggunaan aditif untuk zat yang sangat kompleks, sangat penting dalam menyesuaikan kebiasaan kristal serta kemurniannya, ketika pada konsentrasi rendah maka akan mempengaruhi kinetik *nucleation* dan pertumbuhan kristal. Hal ini diasumsikan bahwa aditif berfungsi untuk menghambat pertumbuhan kristal dengan cara memperlambat laju pertumbuhan kristal, meningkatkan nukleasi heterogen, mengendalikan dan menstabilkan endapan *polymorph*. Hal ini mempengaruhi jumlah aditif pada pengendapan garam yang berkaitan dengan adsorpsi pada permukaan. Salah satu cara untuk mencegah terjadinya kerak yaitu dengan menjaga anion-kation pembentuk kerak tetap berada dalam larutannya. *Scale inhibitor* merupakan suatu bahan kimia yang berfungsi menjaga anion-kation pembentuk kerak tetap berada dalam

larutannya, sehingga diharapkan tidak terjadi pengendapan (Reddy dan Hoch,2010).

Penelitian yang dilakukan Martinod dkk (2007) menunjukkan bahwa polymaleic acid dengan konsentrasi 4 ppm mampu mengurangi pembentukan kerak CaCO_3 pada proses pengintian dan pertumbuhannya. Chen dkk (2004) melaporkan bahwa penambahan aditif mampu menekan terbentuknya vaterite sehingga kerak yang mendominasi berupa calcite. Penyerapan aditif terlihat pada kristal dan menyebabkan peningkatan kekasaran pada permukaan kristal dan distorsi pada kristal.

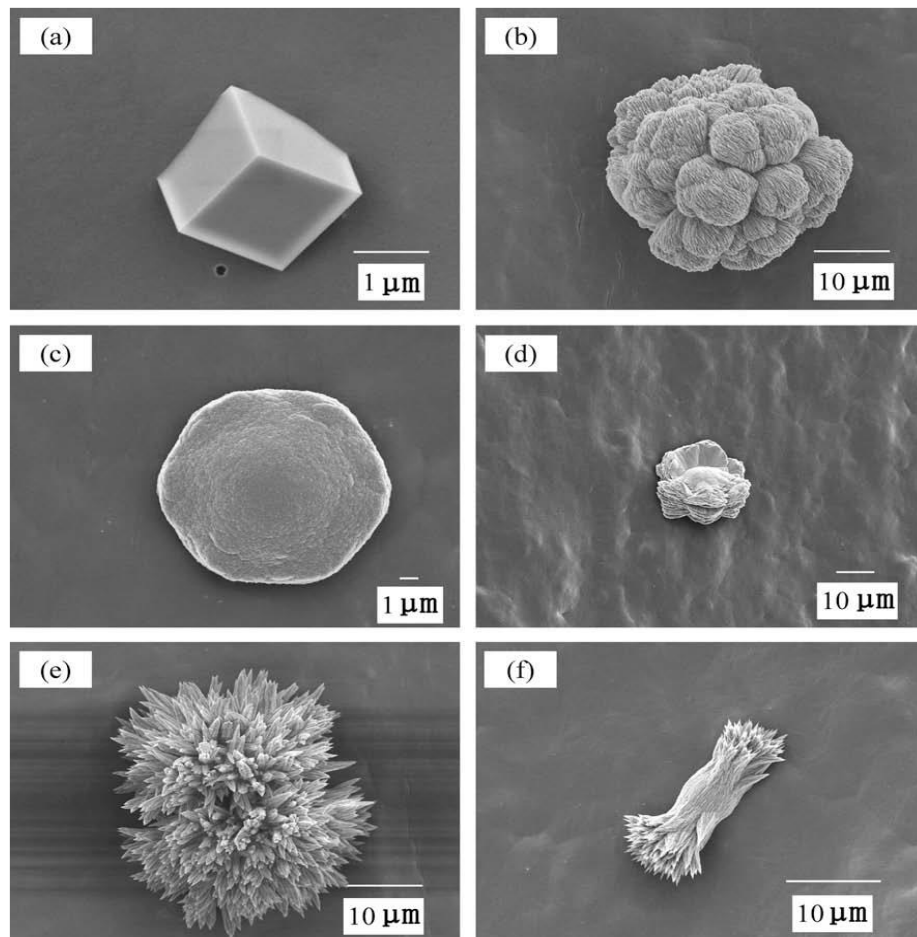
Martos dkk (2010) mengatakan bahwa interaksi aditif pada pembentukan kerak yaitu dengan meningkatkan waktu induksi, atau dengan mencegah pertumbuhan kristal dengan merubah morfologinya. Sedangkan penelitian Michael dan Anthony (2000) menunjukkan bahwa penggunaan larutan aditif konsentrasi rendah (0,01 hingga 1 mg/ltr) mampu menghambat laju pertumbuhan kristal *calcite* dibanding dengan larutan aditif konsentrasi lebih tinggi (hingga 10 mg/ltr) yang tidak memberikan pengaruh apa-apa. Proses penghambatannya yaitu dengan menghalangi tempat - tempat pertumbuhan kristal. Oleh karena itu, dalam percobaan ini digunakan variasi penambahan aditif asam tartrat yaitu 4,6 dan 10 ppm.

2.10. Morfologi kalsium karbonat

Kalsium karbonat *Precipitated* sering disebut dengan PCC mempunyai tiga macam bentuk kristal yaitu kalsit, aragonit, dan vaterit dengan struktur Kristal berturut-turut *rhombohedral*, *orthorombic*, dan *hexagonal*(Hadiko dkk, 2005).

Kalsit merupakan fase yang stabil pada temperatur ruang, sementara vaterit dan aragonit merupakan fase metastabil yang dapat bertransformasi ke dalam fase stabil (kalsit). Perbedaan yang tampak dari ketiga struktur fase yang dimiliki CaCO_3 yaitu pada jumlah atom O yang mengelilingi setiap atom Ca. Formasi struktur yang terjadi pada kalsit, vaterit, dan aragonit secara berturut-turut adalah CaO_6 , CaO_8 , dan CaO_9 (Han dkk, 2005).

Calcite, kristal CaCO_3 yang stabil, tumbuh dari *cluster* pada air sadah, setelah beberapa waktu membentuk padatan kerak dan menempel pada permukaan dimana proses pengintian dimulai. *Aragonite*, terdapat dalam air yang diberi perlakuan magnet, dengan kristal *orthorhombic* yang tidak menempel sehingga dengan mudah terlepas dari permukaan. Pada temperatur dan tekanan normal, kristal tidak stabil *aragonite* berubah tiba-tiba menjadi *calcite*. Kristal CaCO_3 lainnya yaitu *vaterite*, yang memiliki kestabilan paling rendah diantara ketiga *polimorph anhydrous* CaCO_3 dan lambat laun berubah menjadi *calcite* ataupun *aragonite* (Barbara dkk, 1999). Bentuk morfologi kerak kalsium karbonat dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.9. Morfologi *polimorph* CaCO_3 pada tabung PP (*polypropylene*):
 (a) *calcite* dengan bentuk *rhombohedral*; (b) *spherical vaterite*;
 (c) *vaterite (plate-like)*; (d) *vaterite (sunflower-like)*; (e) *aragonite (twin-rosette)*;
 (f) *aragonite (dumbbell)* (Zhen dkk, 2009).

Analisa hasil, kristalisasi kerak kalsium karbonat CaCO_3 yang terbentuk dianalisa dengan menggunakan SEM,EDS,XRD uraian tersebut dapat dijelaskan dalam bab 3 metode penelitian.

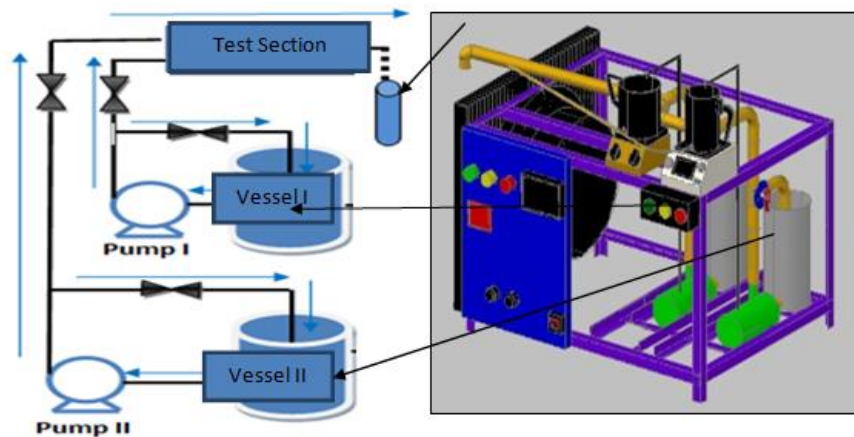
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Larutan Na_2CO_3 dengan konsentrasi Ca^{+2} dibuat dengan melarutkan kristal Na_2CO_3 (*Natrium Carboant*) grade : analitik
- Larutan CaCl_2 dengan konsentrasi Ca^{+2} dibuat dengan melarutkan kristal CaCl_2 (*Calcium Chloride Dihydrad*) grade : analitik
- Zat aditif inhibitor kerak dengan konsentrasi 5 ppm, 10 ppm dan 15 ppm.

3.2. Alat Penelitian



Gambar 3.1. Foto Alat penelitian (Muryanto dkk,2012)

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini di tunjukan pada gambar 3.1 meliputi.

a. Pompa air

Jenis pompa : Iwaki Magnit Pump (Japan)

Kapasitas max : 15 l/mnt

Head total : 4 Meter

Daya	:	25 Watt
b. Mixer dua buah		
Jenis	:	reversible motor (japan)
Tipe	:	2 RJ4GB-A
Daya	:	20 Watt
Rpm	:	30 Rpm
c. Temperatur controller digital dua buah		
Type	:	EKC 102 A
Merk	:	Danfons
Volt/ Freq	:	220/60 Hz
Range	:	-40° C-110° C
d. Konduktivitas Monitor		
Measurement range	:	19 μ / cm / 1 μ s/cm
Temperature compensation range	:	0 – 50 °C
Accuracy	:	\pm 2% f.s
Power supply	:	1,5 V alkaline
e. Volt Meter dan ameter		
Volt meter	:	0 – 300 volt (merk heles)
Ameter	:	0 – 10 ampere (merk heles)
f. Stabilizer Tegangan listrik		
Merek	:	Matsunaga
Max Cap	:	500 Watt
Range	in	: 160 volt – 250 volt
	Out	: 110 volt dan 220 volt

g. Neraca analitik

Tipe	: Danver
Max	: 220 gram
Readability	: 0,0001 gram
Made in USA	: Ohaus Crop, Pine Brook, Nj

h. Gelas ukur

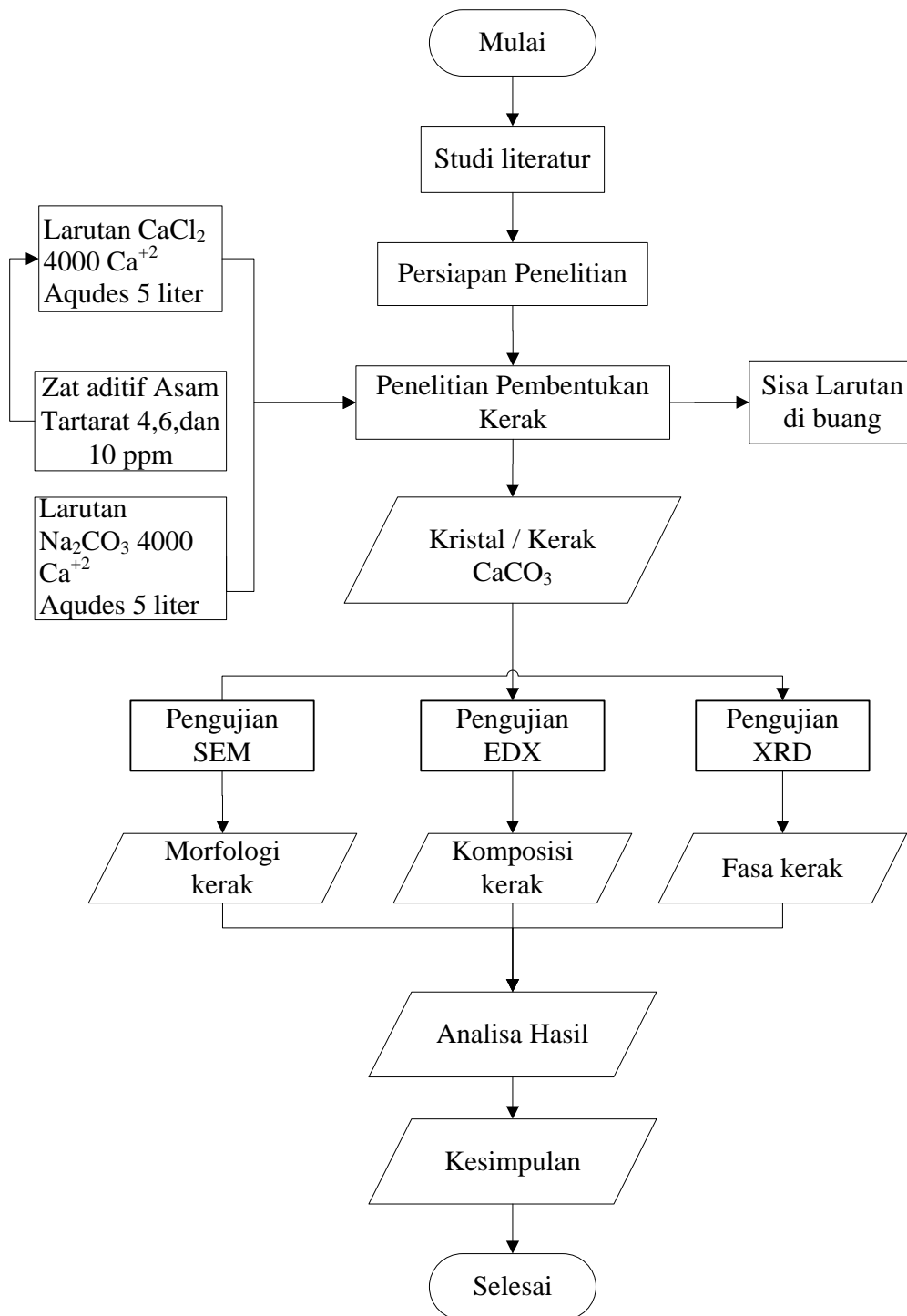
Kapasitas	: 100 ml
Ketelitian	: 1 ml

i. SEM lengkap merek JEOL (Universitas Negeri Malang)

j. Kupon

Panjang	: 31 mm
Diameter luar	: Ø 20 mm
Diameter dalam	: Ø 13 mm
Bahan	: Tembaga
Jumlah	: Lima pasang

3.3. Diagram Alir Penelitian



Gambar3.2. Diagram Alir Penelitian

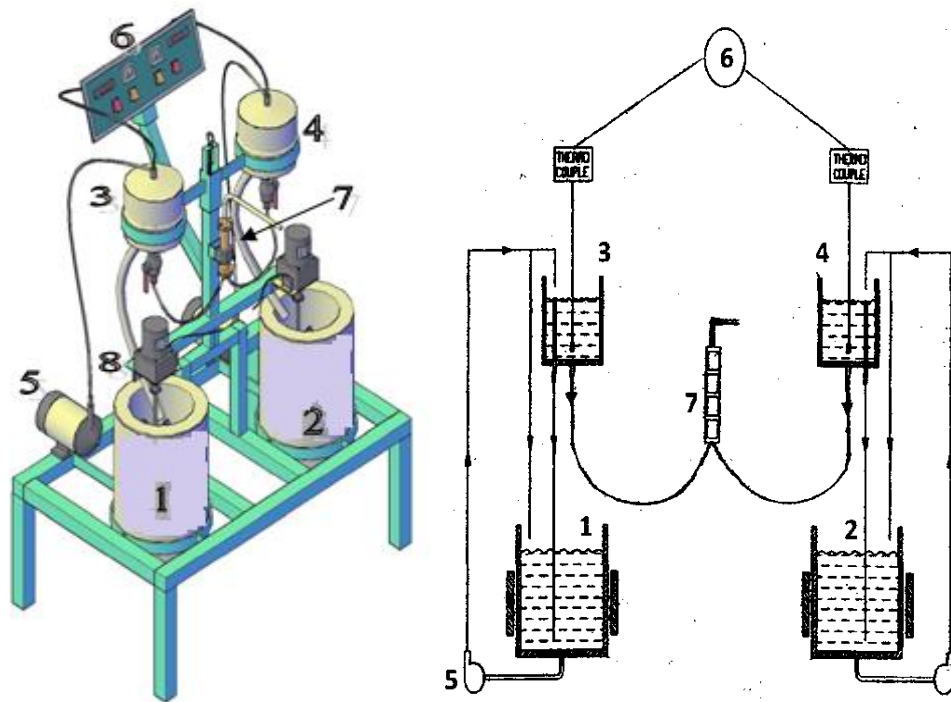
3.4 Langkah Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pembentukan kerak pada pipa beraliran laminar dengan melalui tahapan-tahapan sebagai berikut ini :

3.4.1. Alat Eksperimen Pembentukan kerak

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat yang di rancang sendiri oleh peneliti terdahulu. Alat tersebut terdiri dari empat buah bejana yaitu dua bejana dibawah (1,2) dengan kapasitas 6 liter dan dua bejana diatas (3, 4) dengan kapasitas 0,8 liter. Kegunaan bejana tersebut adalah untuk menampung larutan CaCl_2 pada bejana 1 dan 3 dan larutan Na_2CO_3 pada bejana 2 dan 4. Pada alat tersebut dipasang dua buah pompa yang digunakan untuk memompa larutan CaCl_2 dari bejana 1 ke bejana 3 dan larutan Na_2CO_3 dari bejana 2 ke bejana 4. Permukaan larutan pada bejana 3 dan 4 dijaga agar keduanya mempunyai ketinggian yang sama dan dapat diatur naik atau turun guna mendapatkan perbedaan ketinggian permukaan dengan pengeluaran akhir dari rumah kupon sehingga dapat digunakan untuk mengatur laju aliran.

Larutan yang berada didalam bejana 3 dan 4 kemudian secara bersamaan dialirkan menuju kupon, selanjutnya larutan tersebut mengalir dan masuk kedalam bejana penampungan yang kemudian dibuang sebagai limbah. Didalam kupon-kupon larutan CaCl_2 dan Na_2CO_3 bereaksi sehingga membentuk kerak. Kerak tersebut mengendap pada dinding-dinding kupon yang disebut sebagai kerak CaCO_3 . Untuk melihat perubahan nilai konduktivitasnya maka larutan yang keluar dari kupon diukur dengan menggunakan alat conductivitymeter. Pengukuran konduktivitas larutan dilakukan selama empat jam dengan rincian sebagai berikut setiap dua menit sekali pada dua jam pertama, setiap lima menit sekali pada satu jam ketiga dan sepuluh menit sekali pada satu jam ke empat.



Gambar 3.3. Alat penelitian dan blok diagram(Muryanto dkk,2012)

- | | |
|--|-----------------------|
| 1. Bejana bawah Na_2CO_3 | 5. Pompa |
| 2. Bejana bawah CaCl_2 | 6. Temperatur control |
| 3. Bejana atas Na_2CO_3 | 7. Kupon dan rumahnya |
| 4. Bejana atas CaCl_2 | 8. Mixer |

3.4.2 Pengujian Alat

Pengujian alat meliputi kecepatan aliran meninggalkan kupon tepat sesuai desain yaitu 25 ml/menit. Pengujian dilakukan dengan cara trial and error sebanyak sepuluh kali dengan mengatur harga Δh yaitu selisih ketinggian antara permukaan larutan pada bejana 3 dan 4 terhadap saluran pembuangan limbah atau pengeluaran aliran pada akhir kupon setelah itu dihitung standar deviasinya. Dengan demikian alat yang dibuat mempunyai laju alir yang stabil 25 ml/menit.

Conductivitymeter adalah instrumen yang digunakan untuk mengukur konduktivitas larutan. Keakuratan instrumentasi ini bisa diuji dengan melakukan pengukuran terhadap konduktivitas aquades. Bila *conductivitymeter* menunjukkan angka nol pada waktu mengukur konduktivitas aquades maka instrumen ini akurat, sebab aquades tidak memiliki ion-ion penghantar listrik.

3.5 Pengujian laju alir

Pengujian laju alir dilakukan untuk mendapatkan setingan laju alir yang diinginkan, pada pengujian ini laju alir yang akan diteliti adalah sebesar 25,35,45 ml/menit. Selanjutnya menghitung secara teori bahwa aliran 35ml/menit hingga 5ml/menit dengan diameter pipa 13 mm merupakan aliran laminar, perhitungan ini dibuktikan dengan bilangan Reynold yang ada di lampiran. Langkah pertama pengujian laju alir adalah dengan mengatur beda ketinggian (Δh) yaitu selisih ketinggian antara permukaan larutan pada bejana 3 dan 4 dengan saluran pengeluaran aliran larutan pada kupon. Semakin tinggi beda ketinggiannya maka laju alirannya semakin besar. Pada pengujian ini bejana 3 dan 4 diatur pada posisi tertentu kemudian larutan yang keluar dari saluran pembuangan diukur volumetriknya dengan gelas ukur selama 60 detik. Besar laju alir adalah volume larutan didalam gelas ukur dibagi dengan waktu pengukuran. Pengukuran tersebut dilakukan sebanyak 5 kali dengan rentang waktu tertentu yang bertujuan untuk memastikan bahwa laju alir selama pengujian adalah sama.

3.5.1 Pembuatan Larutan CaCl_2 , Na_2CO_3 dan Asam Tartrat ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$) Sebagai Aditif

Pembentukan kerak CaCO_3 pada penelitian ini dapat dilihat pada reaksi kimia larutan CaCl_2 dengan Na_2CO_3 dibawah ini



Untuk membuat larutan CaCl_2 dengan Na_2CO_3 pertama-tama dilakukan perhitungan konsentrasi kalsium yang direncanakan yaitu 4000 ppm Ca^{2+} dengan laju alir sebesar 25 ml/menit. Perhitungan pembuatan larutan diambil konsentrasi larutan 4000 ppm Ca^{2+} .

Cara perhitungan kebutuhan zat dan larutan untuk percobaan dengan laju alir 25 ml/menit.

Waktu percobaan = 4 jam

Laju alir larutan = 25 ml/menit

Volume larutan yang dibutuhkan (4x60x 25ml) = 6000 ml

Volume larutan $\text{CaCl}_2 = 6000 \text{ ml} / 2 = 3000 \text{ ml}$

Volume larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 3000 \text{ ml}$

Setiap percobaan ada sisa larutan masing - masing ditabung atas sebanyak 800 ml maka untuk memudahkan pembuatan larutan, kedua jenis larutan tersebut masing-masing disiapkan sebanyak 4000 ml sehingga jumlah larutan yang dibutuhkan adalah :

Volume larutan CaCl_2 yang disiapkan = 4000 ml

Volume larutan Na_2CO_3 yang disiapkan = 4000 ml

Kedua larutan dibuat secara terpisah dengan cara melarutkan *aquades* dengan kristal CaCl_2 dan Na_2CO_3 .

Perhitungan kebutuhan larutan untuk laju alir 25 ml/menit

Berat molekul (BM) $\text{CaCl}_2 = 110,98 \text{ g/mol}$

Berat Atom (BA) Ca = 40

Berat molekul (BM) $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 105,99 \text{ g/mol}$

4000 ppm $\text{Ca}^{2+} = 4000 \text{ mg/ liter}$

Untuk volume 4000 ml atau 4 liter, kebutuhan Ca^{2+} adalah

$4000 \text{ mg/litert} \times 4 \text{ lt} = 16.000 \text{ mg} = 16 \text{ gram}$

Sehingga CaCl_2 yang dibutuhkan adalah

$$(110,98 / 40) \times 16 \text{ gram} = \mathbf{44,392 \text{ gram}}$$

$$\text{Berat atom (BA) Ca} = 40 \text{ maka } 16 / 40 = 0,4 \text{ mol}$$

Karena equimolar maka kristal Na_2CO_3 yang dibutuhkan adalah

$$0,45 \times 105,99 = \mathbf{46,296 \text{ gram}}$$

Untuk kebutuhan asam tartrat 4 ppm, 6 ppm dan 10 ppm adalah sebagai berikut

$$4 \text{ ppm} = 4 \text{ mg /liter} \quad 6 \text{ ppm} = 6 \text{ mg/liter} \quad 10 \text{ ppm} = 10 \text{ mg/liter}$$

Kebutuhan asam tartrat 4 ppm dalam 8 liter larutan adalah

$$4 \text{ mg/lit} \times 8 \text{ lt} = 32 \text{ mg}$$

Kebutuhan kristal asam tartrat 4 ppm dalam 8 lt larutan adalah

$$\text{Berat Molekul (BM) asam tartrat} = 150,087$$

$$\text{Berat Atom (BA) asam tartrat} = 29,018$$

$$(150,087 / 29,018) \times 32 = 165,516 \text{ mg} = \mathbf{0,165 \text{ gram}}$$

Kebutuhan asam tartrat 6 ppm dalam 8 lt larutan adalah

$$6 \text{ mg/lit} \times 8 \text{ lt} = 48 \text{ mg}$$

Kebutuhan kristal asam tartrat 6 ppm dalam 8 lt larutan adalah

$$(150,087 / 29,018) \times 48 = 248,265 \text{ mg} = \mathbf{0,248 \text{ gram}}$$

Kebutuhan asam tartrat 10 ppm dalam 8 lt larutan adalah

$$10 \text{ mg/lit} \times 8 \text{ lt} = 80 \text{ mg}$$

Kebutuhan kristal asam tartrat 10 ppm dalam 8 lt larutan adalah

$$(150,087 / 29,018) \times 80 = 413,776 \text{ mg} = \mathbf{0,413 \text{ gram}}$$

Dari hasil perhitungan seluruhnya dapat dimasukkan dalam tabel sehingga mudah untuk dijadikan pedoman pada saat pembuatan larutan. Adapun kebutuhan konsentrasi larutan maupun aditif asam tartrat seperti tertera dalam tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1. Perhitungan Kebutuhan Massa CaCl_2 , Na_2CO_3 dan aditif asam tartrat

Laju alir ml/menit	CaCl_2	Na_2CO_3	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$ 4 ppm (gram)	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$ 6 ppm (gram)	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$ 10 ppm (gram)
25	44,392	44,2966	0,1655	0,2482	0,4137
35	61,039	58,2945	0,2275	0,3413	0,5689
45	72,137	68,8935	0,2689	0,4034	0,6729

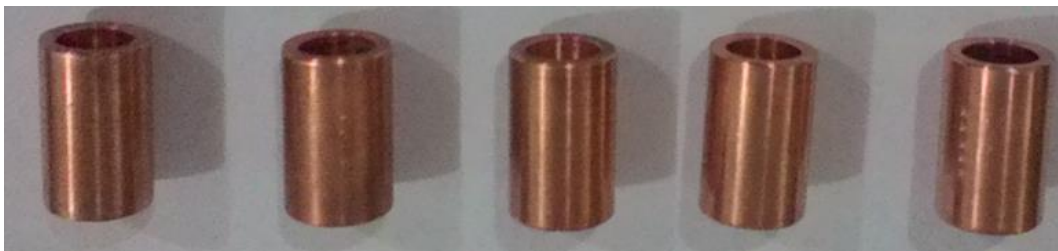
Setelah semua perhitungan yang diperlukan untuk pembuatan larutan selesai maka dilanjutkan untuk persiapan pembuatan larutan tersebut. Bahan dan peralatan yang diperlukan dalam pembuatan larutan adalah *aquades*, kristal CaCl_2 , kristal Na_2CO_3 , kristal $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$, timbangan analitik, gelas ukur, labu takar, pengaduk dan kertas saring. Pembuatan larutan dimulai dengan menimbang kristal CaCl_2 dan kristal Na_2CO_3 sesuai dengan hasil perhitungan. Langkah selanjutnya adalah memasukkan *aquades* sebanyak satu liter dan kristal CaCl_2 kedalam bejana kemudian diaduk dan dilanjutkan lagi dengan memasukkan *aquades* kedalam bejana hingga volumenya mencapai lima liter dan diaduk lagi sampai merata. Setelah larutan tercampur merata maka dilakukan penyaringan dengan kertas saring 0,22 μm . Sebelum digunakan larutan disimpan dalam bejana tertutup agar terhindar dari debu.

Pembuatan larutan Na_2CO_3 dilakukan dengan cara yang sama seperti pada pembuatan larutan CaCl_2 . Sedangkan untuk pembuatan aditif asam tartrat dilakukan dengan cara menimbang kristal $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ sesuai dengan hasil perhitungan dan dilanjutkan dengan memasukkan $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ kedalam bejana yang berisi lima liter larutan CaCl_2 kemudian diaduk sampai merata, saring larutan tersebut menggunakan kertas saringan dan disimpan seperti pada pembuatan larutan tanpa aditif.

Pembentukan kalsium karbonat: $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{NaCl}$. Untuk membuat larutan CaCl_2 dan Na_2CO_3 , dilakukan perhitungan konsentrasi larutan dengan laju alir 25 ml/menit.

3.6 Persiapan Pipa Uji

Jenis kupon yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis kupon yang terbuat dari pipa kuningan (*seamless brass tube*) dengan kadar tembaga antara 60-90%. Kupon adalah komponen yang dipasang pada sistem aliran yang diharapkan disitulah akan terjadi pengendapan kerak kalsium karbonat. Kupon berbentuk pipa yang selanjutnya dikerjakan melalui proses permesinan menjadi bentuk pipa.



Gambar 3.4. Kupon

Jumlah kupon ada lima dipasang dari bawah ke atas masuk ke rumah kupon. dimensi kupon adalah; panjang 31 mm diameter luar 20 mm dan diameter dalam 13 mm. Sebelum dipasang pada rumahnya terlebih dahulu kupon dipoles hingga permukaan bagian dalam menjadi kasar dan di ukur kekasarannya. Selanjutnya dicelupkan ke dalam cairan HCl selama 3 menit kemudian dibilas

dengan air bersih dan terakhir dibilas dengan aquades. Setelah itu dikeringkan memakai hairdryer, dengan demikian kupon siap dipasang pada rumah kupon.

3.7 Pengambilan Data

Pengambilan data (percobaan) dilakukan dengan variasi laju alir (25, 35, 45 ml/menit) dan aditif asam Tartrat (4, 6, 10 ppm), dimana tiap variasi laju alir dan aditif dilakukan sebanyak tiga kali percobaan, sehingga total percobaan yang dilakukan sebanyak 45 kali. Larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 masing-masing sebanyak lima liter dimasukkan masing-masing ke dalam bejana 1 dan bejana 2. Setelah itu pompa dihidupkan dan larutan naik mengisi sampai batas atas bejana 3 dan bejana 4, kemudian pompa dimatikan. Beberapa saat kemudian pompa dihidupkan kembali dan larutan mulai mengisi kupon, dengan demikian percobaan telah dimulai. Pencatatan waktu pada saat yang sama juga diaktifkan dimana setiap dua menit sekali perlu dilakukan pengukuran terhadap konduktivitas larutan. Untuk melakukan pengukuran konduktivitas larutan, larutan yang keluar dari kupon ditampung pada bejana kecil yang terbuat dari plastik dan sesegera mungkin elektroda conductivitymeter dimasukkan.

Conductivitymeter akan mengukur nilai konduktivitas larutan (pembacaan digital mulai berjalan dari nol kemudian naik sampai akhirnya berhenti). Angka yang terakhir inilah yang dicatat, dan seterusnya dilakukan berulang-ulang setiap dua menit. Setelah empat jam, pompa dihentikan dan saluran menuju kupon dilepas. Satu jam kemudian kupon diambil dari rumah kupon dan dikeringkan dalam oven dengan suhu 60°C selama dua belas jam. Penimbangan massa kerak dilakukan pada waktu kerak masih menempel pada kupon. Selanjutnya selisih massa kupon dengan kerak dikurangi massa kupon tanpa kerak adalah massa kerak itu sendiri.

3.8 Pengujian SEM, Microanalyzer (EDX) dan XRD

Pengujian SEM dan EDX Microanalyzer bisa dilakukan pada instrumen yaitu dengan menggunakan perangkat SEM- EDX. Pengujian SEM dilakukan untuk mengkaji morfologi kristal sedangkan pengujian microalyser bertujuan untuk mengetahui komposisi kristal. Kedua pengujian ini dilakukan dengan *scanning electron microscopy* (SEM) dan dilakukan pada laboratorium fakultas MIPA Universitas Negeri Malang.

Pada pengujian ini yang dilakukan terdahulu adalah langkah persiapan yaitu pemberian nomor pada spesimen dan pelapisan spesimen dengan AuPd (*Aurum Paladium*). Pada proses ini spesimen diletakkan pada dudukan sesuai dengan nomor identifikasi dan selanjutnya dimasukkan kedalam mesin *Sputter Coater*. Setelah spesimen dimasukkan kedalam tabung kaca pada *Sputter Coater* dilakukan penghisapan udara yang berada dalam ruang kaca sehingga udara di dalam tabung habis dan dilanjutkan dengan pengisian gas argon kedalam tabung kaca. Setelah itu barulah dilakukan coating AuPd terhadap spesimen di dalam tersebut.

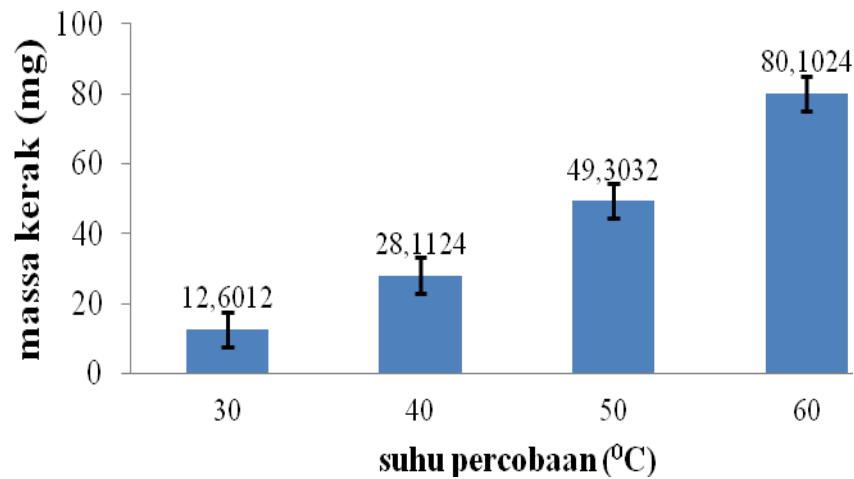
Langkah berikutnya spesimen dimasukkan ke dalam SEM sesuai dengan nomor identifikasi pengambilan fokus. Selanjutnya dilakukan pengisapan udara pada alat tersebut sehingga terjadi kevakuman, Kemudian dilakukan pengambilan gambar, pengaturan resolusi dan ukuran pembesaran dikendalikan melalui *software* yang secara langsung terbaca pada monitor SEM. Setelah mendapatkan hasil pengujian SEM seperti yang diharapkan maka dilanjutkan untuk mengkaji struktur mikro dengan menggunakan alat *microanalyser* dimana perangkat keras dan *software* telah dipasang integrated dalam alat SEM sehingga tidak perlu melepas atau memindahkan spesimen, dengan mengambil luasan tertentu yang akan dilakukan analisa instrument hanya memerlukan waktu yang lama untuk mengetahui komposisi kristal baik dalam prosentase berat maupun atom.

BAB 4

PEMBENTUKAN DAN PENGENDALIAN KERAK CaCO_3 DALAM PIPA BERALIRAN LAMINAR

4.1 Pengaruh Suhu terhadap Massa Kerak Kalsium Karbonat

Massa kerak CaCO_3 terdeposit dalam pipa selama percobaan ditunjukkan dalam Gambar 2.1. Gambar 2.1 menunjukkan peningkatan suhu membuat kecepatan deposisi kerak meningkat (Muryanto dkk, 2014; Raharjo dkk., 2016; Tijing dkk., 2011; Amor dkk., 2004). Variabel suhu (30, 40, 50, 60°C) dengan toleransi $\pm 0,5^\circ\text{C}$ menunjukkan peningkatan massa kerak CaCO_3 dengan peningkatan temperatur. Massa kerak CaCO_3 pada suhu 30°C (12,6012 mg), suhu 40°C (28,1124 mg), suhu 50°C (49,2032 mg), dan suhu 60°C (80,1024 mg).



Gambar 4.1 Pengaruh suhu terhadap massa kerak CaCO_3 dalam pipa

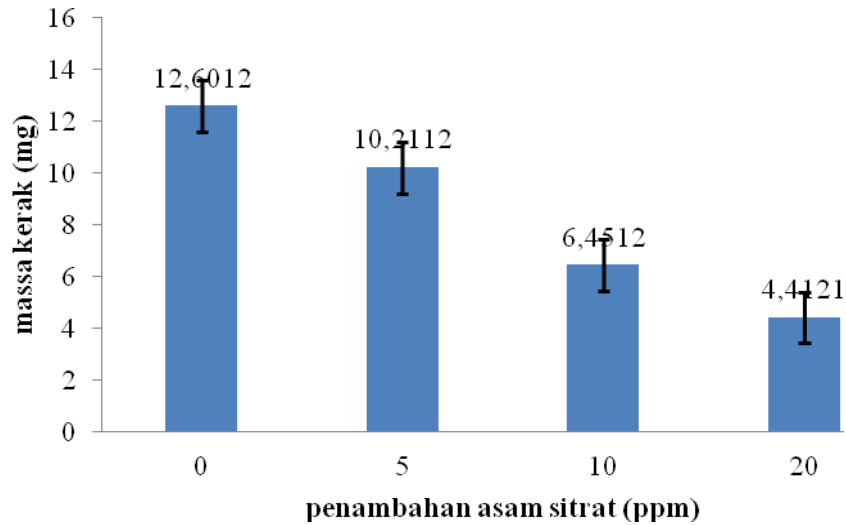
Pada Gambar 4.1, menunjukkan bahwa pada kondisi suhu yang tinggi, massa kerak CaCO_3 semakin meningkat. Hal ini menunjukkan pada kondisi suhu tinggi reaksi antara reaktan CaCl_2 dan Na_2CO_3 berjalan lebih cepat dibanding pada kondisi suhu yang lebih rendah. Semakin tinggi suhu dalam suatu reaksi akan memberikan tekanan yang kuat, tumbukan antara molekul reaktan CaCl_2 dan Na_2CO_3 akan semakin banyak, sehingga kecepatan reaksi akan meningkat (Alice dkk., 2011; Basim dkk., 2012; Gourdon, 2011; Zhang, 2002). Setiap partikel selalu bergerak dengan menaikkan temperatur, energi gerak atau energi kinetik partikel bertambah, sehingga tumbukan lebih sering terjadi dengan frekuensi tumbukan yang semakin besar, maka

kemungkinan terjadinya tumbukan efektif yang mampu menghasilkan reaksi juga semakin besar. Suhu atau temperatur juga mempengaruhi energi potensial suatu zat. Zat-zat yang energi potensialnya kecil, jika bertumbukan akan sukar menghasilkan tumbukan efektif. Hal ini karena zat-zat tersebut tidak mampu melampui energi akt2asi. Dengan menaikkan suhu, maka hal ini akan memperbesar energi potensial sehingga ketika bertumbukan akan menghasilkan energi (Rabizadeh dkk., 2014; Plavsic, dkk.,1999; Setta and Neville, 2011; Wada, dkk., 2001).

4.2 Pengaruh Aditif Asam Sitrat terhadap Pembentukan Kerak CaCO₃

Hasil percobaan pada penambahan asam sitrat terhadap massa kerak ditunjukkan dalam Gambar 2.2. Pengujian variabel konsentrasi asam sitrat (5 ppm, 10 ppm, 20 ppm) menunjukkan penurunan massa kerak dengan meningkatnya konsentrasi aditif asam sitrat (Rabizadeh dkk. 2016; Raharjo., dkk., 2016; Muryanto dkk., 2014). Asam sitrat dipilih sebagai aditif untuk menghambat pertumbuhan kerak karena asam sitrat merupakan asam lemah yang aman untuk lingkungan tetapi memiliki daya hambat yang kuat terhadap pembentukan kerak (Rabizadeh dkk., 2014; Isopecus dkk., 2010). Massa kerak diamati dalam kerak CaCO₃ dengan keberadaan 5 ppm asam sitrat (10.21 mg), dengan 10 ppm asam sitrat (6.45 mg) dan 20 ppm asam sitrat (4.41 mg) merupakan tiga kali lebih kecil dibandingkan dengan tanpa penambahan asam sitrat (13 mg).

Penggunaan aditif mampu mengurangi massa kerak yang terbentuk sesuai dengan penelitian Singh dan Middendorf (2007) yang menemukan bahwa penambahan aditif dapat menekan atau menurunkan laju reaksi sehingga massa kerak yang terbentuk semakin berkurang. Hal yang sama juga didapat dari penelitian yang dilakukan Rabizadeh (2014) dimana penggunaan aditif mampu menghambat laju pertumbuhan kristal dengan menghalangi tempat pertumbuhan kristal.

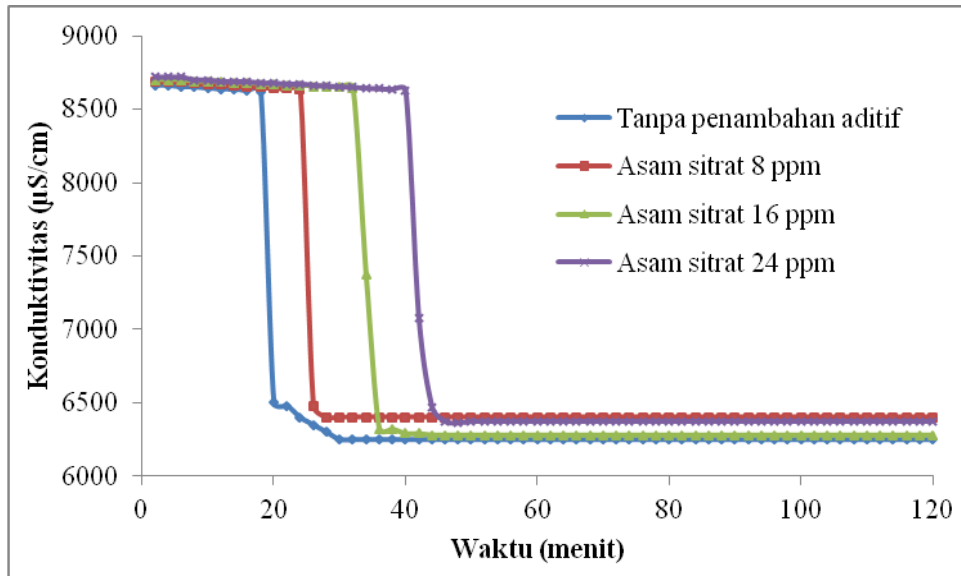


Gambar 4.2. Pengaruh asam sitrat terhadap massa kerak CaCO_3

Mao dan Huang (2007) juga menemukan bahwa pertumbuhan CaCO_3 berkurang dengan adsorpsi asam karboksilat pada permukaan kristal CaCO_3 . Di samping menghambat pertumbuhan kristal yang juga berarti menghambat pertumbuhan kerak, aditif juga dapat menghambat pembentukan inti kristal. Pembentukan inti kristal akan terganggu apabila aditif teradsorpsi pada permukaan inti kristal yang sedang tumbuh sehingga inti tidak dapat mencapai ukuran kritis, dan dengan demikian inti kristal kembali terurai menjadi komponen-komponennya (Mao dan Huang, 2007).

4.3 Penentuan Waktu Induksi Selama Presipitasi Calcium Carbonat

Analisa yang dilakukan yaitu tentang waktu yang dibutuhkan oleh senyawa kalsium karbonat untuk membentuk inti kristal pertama kali. Waktu induksi ditandai dengan menurunnya nilai konduktifitas larutan secara tajam yang menandakan bahwa ion kalsium telah bereaksi dengan ion karbonat dan mengendap membentuk kerak (Wang dkk., 2010; Isopecus dkk., 2010). Waktu induksi untuk penambahan asam sitrat 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm dan tanpa penambahan masing-masing menunjukkan nilai yang berbeda seperti yang terlihat pada **Gambar 4.3**. Grafik hubungan antara konduktifitas dengan waktu.



Gambar 4.3. Waktu induksi pada presipitasi CaCO_3

Hasil penambahan asam sitrat (5, 10, 20 ppm) menunjukkan peningkatan waktu induksi dengan meningkatnya konsentrasi aditif asam sitrat (Gambar 2.3). Waktu induksi diamati dalam sistem CaCO_3 dengan keberadaan 5 ppm asam sitrat (16 menit), dengan 10 ppm asam sitrat (20 menit). Keberadaan 20 ppm asam sitrat (26 menit) menunjukkan waktu induksi dua kali lebih besar daripada tanpa penambahan asam sitrat (12 menit). Dari Gambar 2.3 terlihat bahwa semakin tinggi konsentrasi asam sitrat, semakin lambat waktu induksi yang terjadi, semakin besar waktu induksi berarti semakin lambat inti kristal terbentuk (Muryanto dkk, 2014). Penggunaan konsentrasi aditif lebih besar, memperpanjang waktu induksi (Setta dan Neville 2011; Mao and Huang, 2007). Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Martos dkk (2010) yang mengatakan bahwa penggunaan aditif memperlama waktu induksi. Penambahan aditif mampu mengurangi pembentukan kerak CaCO_3 pada proses pengintian dan pertumbuhannya (Martinod dkk, 2007).

4.4 Permodelan dan Optimasi Variabel Kerak CaCO_3

Berdasarkan ketiga variabel percobaan tersebut, dilakukan optimasi terhadap interaksi ketiga variabel (suhu, konsentrasi Ca^{2+} dan asam sitrat) terhadap respon massa kerak. Optimasi variabel dilakukan dengan metode statistik yaitu dengan cara *Response Surface Methodology*

RSM, menggunakan software Statistica 6. Hasil optimasi berupa model persamaan yang menghasilkan massa kerak optimum (Tatiene dkk., 2007).

Kondisi eksperimen menunjukkan bahwa hasil optimasi dengan respon massa kerak terhadap suhu 56.452° C ; konsentrasi Ca²⁺ 2781.452 ppm dan asam sitrat 11.92 ppm mengakibatkan optimum kerak massa 281,664 mg. Sesuai dengan hasil eksperimen di atas dapat dibuat untuk optimasi, sehingga persamaan sebagai berikut :

$$\text{Massa kerak (Y)} = -951.052 + 17.022X_1 - 0.065X_1^2 + 0.018X_2 + 0.0001X_2^2 - 44.56X_3 - 0.765X_3^2 - 0.003X_1X_2 + 1.04X_1X_3 + 0.002X_2X_3 \dots\dots\dots(1)$$

Dimana : X₁: suhu; X₁²: quadratic suhu; X₂ : konsentrasi Ca²⁺; X₂² : quadratic konsentrasi Ca²⁺; X₃: asam sitrat; X₃² : quadratic asam sitrat; X₁X₂: interaksi suhu and konsentrasi; X₁X₃ : interaksi suhu dan asam sitrat; X₂X₃: interaksi konsentrasi dan asam sitrat.

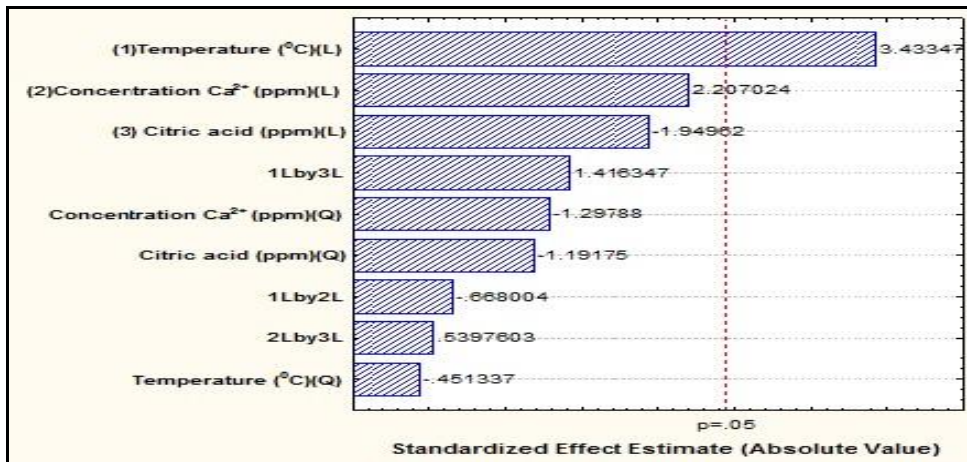
Analysis of Variance (ANOVA) untuk massa kerak disajikan pada Tabel 2.1. Pengaruh pentingnya faktor dapat dilihat dari F dan p value. p - value adalah probabilitas menolak hipotesis nol penelitian. Jika hipotesis nol dapat dikategorikan ternyata benar, nilai p - value kurang dari 0,05 dengan akurasi 95% diperoleh menunjukkan variabel yang memiliki efek signifikan. F - nilai adalah rasio antara *Squares Mean Factor*(SMF) dari *Squares Mean Error*(SME) (Tang dkk., 2004; Steinberg and Bursztyn, 2010). Faktor dapat dikatakan memiliki dampak yang signifikan , jika -nilai F lebih besar dari F – tabel.

Tabel 2.1 *Analysis of Variance* (ANOVA) optimasi variabel dengan respon massa kerak

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-value	F-table	R ²
S.S. Regression	62,611.53	9	62,611.53	23.2174	4,1	0,952
S.S. Error	16,153.61	6	2693.27			
S.S. Total	78,771.14	15				

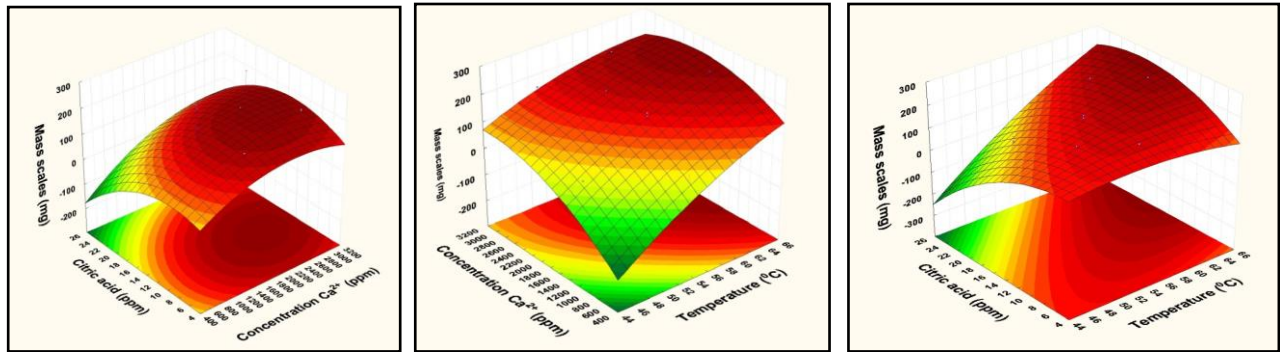
Kesesuaian persamaan model untuk massa timbangan respon dapat dinilai oleh beberapa kriteria. Hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) menunjukkan massa kerak respon memiliki koefisien determinasi diperoleh R² = 0,964. Ini menunjukkan hanya 4,8 % dari total variasi yang

tidak sesuai dengan model kesetaraan, sedangkan kesesuaian persamaan model dengan respon massa kerak diuji dengan statis Fisher (F) (Wang,dkk., 2008). Nilai dari model -nilai F dibandingkan dengan F - tabel, menyediakan bahwa F -nilai (23,2174) untuk setiap efek dan untuk F - tabel (9; 6; 0,05) dari 4,1 diperoleh . Berdasarkan hasil untuk respon massa kerak *Analysis of Variance* (ANOVA), F -nilai lebih besar dari F - tabel . Ini membuktikan efek yang signifikan pada variabel respon timbangan massa. Perkiraan serupa dapat dilihat pada Bagan Pareto, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4.Grafik pareto optimasi variabel dengan respons massa kerak kalsium karbonat (mg)

Nilai p - value kurang dari 0,05 menunjukkan bahwa variabel memiliki efek yang signifikan. Pareto chart menunjukkan variabel-variabel optimasi pada respon dari massa kerak (mg), dengan efek yang paling berpengaruh adalah linear dari suhu (X_1). Pengaruh efek konsentrasi linear (X_2), linear dari asam sitrat (X_2), interaksi antara suhu dan asam sitrat (X_1X_3), konsentrasi kuadrat (X_2^2), kuadrat dari asam sitrat (X_3^2), interaksi antara suhu dan konsentrasi (X_1X_2), interaksi dan konsentrasi asam sitrat (X_1X_3), suhu kuadrat (X_1^2) dapat diabaikan karena tidak memberikan efek yang signifikan pada respon dari massa kerak (Boyaci, 2005). Gambar 4.5 grafik kontur ini memiliki hubungan antara model persamaan dengan variabel pada massa kerak (mg).



Gambar 4.5.3D grafik variable pengaruh pada respon massa kerak CaCO_3

Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu mengakibatkan peningkatan massa kerak (mg). Peningkatan konsentrasi signifikan dengan peningkatan dalam massa kerak, sedangkan peningkatan efek asam sitrat dalam hilangnya massa kerak. Meskipun X_2 (konsentrasi) dan X_3 (asam sitrat) adalah faktor yang mempengaruhi massa kerak, X_1 (suhu) memiliki efek yang besar pada massa kerak. Hal ini terjadi karena peningkatan suhu menyebabkan peningkatan kecepatan reaksi dan tabrakan antara molekul lebih cepat. Sehingga massa kerak terbentuk meningkat. Dengan memasukkan nilai variabel optimum ke dalam persamaan rasio optimal dari respon variabel optimasi massa kerak optimum ditemukan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Massa kerak optimum

Factor	Kondisi optimum	Massa kerak optimum (mg)
Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	56.452	
Konsentrasi Ca^{2+} (ppm)	2781.435	281.644
Asam sitrat (ppm)	11.92	

4.5. Nilai Validasi Prediksi pada Variabel Optimal

Verifikasi dilakukan untuk membandingkan hasil optimasi *Response Surface Methodology* (RSM) dengan hasil percobaan laboratorium. Perbandingan itu untuk memperoleh error % verifikasi variabel optimal. Nilai verifikasi % kesalahan mengakibatkan nilai prediksi pada variabel optimal seperti disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Validasi nilai prediksi pada variabel optimal

Variabel optimal	Hasil Optimum RSM	Hasil Experiment	% <i>Relat2e</i> <i>Error</i>
Response : massa kerak			
Suhu (°C)	: 56.452		
Konsentrasi Ca ²⁺ (ppm)	: 2781.435	281.644	295.21 4.58%
Asam sitrat (ppm)	: 11.92		

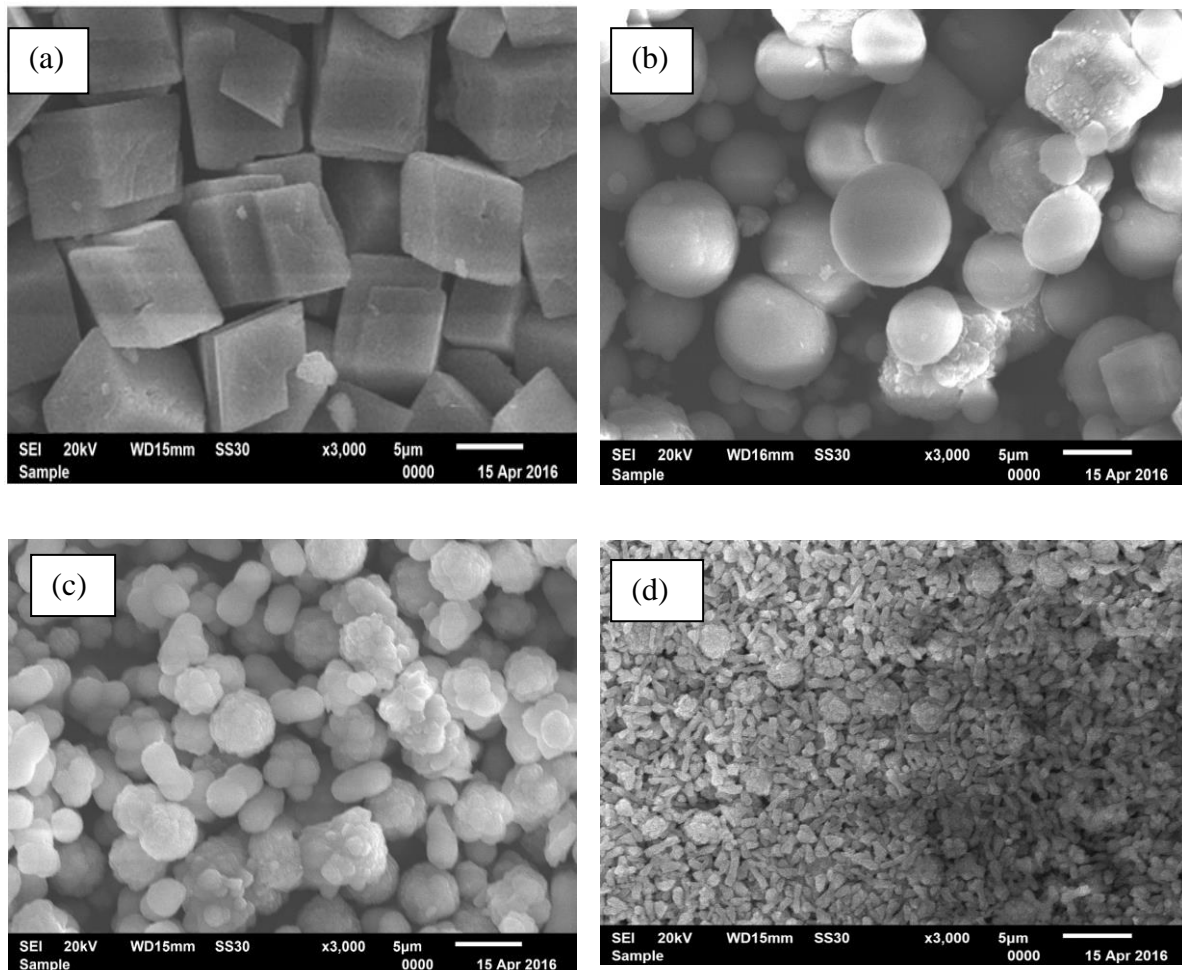
$$\text{Relative error (\%)} = [(Hasil\ Experimental - Hasil\ Optimum\ RSM) / Hasil\ Experimental] \times 100\%$$

Hasil percobaan menunjukkan bahwa rasio *Response Surface Methodology* (RSM) optimum untuk analisis menggunakan massa respon massa kerak adalah 281,644 mg. Error % untuk respon kerak massa adalah 4.58 % sehingga nilai akurasi adalah 95,42% . Oleh karena itu hasil dari *Response Surface Methodology* (RSM) untuk analisis optimalisasi massa kerak CaCO₃.

4.6 Hasil Mikrostruktur Deposit Kalsium Karbonat

4.6.1 Analisa Hasil *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Penambahan asam sitrat juga berpengaruh terhadap perubahan morfologi kristal yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Penambahan aditif asam sitrat 5; 10; 20 ppm, dihasilkan tipe kristal vaterite dengan perubahan bentuk akibat penambahan aditif asam sitrat (Rabizadeh dkk., 2014). Jadi, Asam sitrat memiliki potensi yang efektif untuk mengendalikan kristal kalsium karbonat dan ukuran butir. Kajian Morfologi kristal kalsium karbonat CaCO₃ dilakukan untuk mengidentifikasi apakah kristal hasil percobaan benar-benar kerak kalsium karbonat. Kerak tersebut merupakan kumpulan partikel CaCO₃ yang mengendap di dalam permukaan pipa. Kristal CaCO₃ sendiri memiliki tiga bentuk fasa yang berbeda yang akan menentukan jenis morfologi kerak yang terbentuk. Oleh sebab itu, penting untuk mengetahui pengaruh suhu dan penambahan aditif asam sitrat terhadap jenis kristal CaCO₃ yang terbentuk di dalam permukaan pipa uji. Untuk mengetahui bentuk morfologi kristal kalsium karbonat di gunakan alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dengan pembesaran tertentu sehingga dapat di indentifikasi perbedaan bentuk kristal. Hasil dari *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dari kristal hasil percobaan di tujukan pada Gambar 4.6



Gambar 4.6. Pengaruh aditif asam sitrat terhadap morfologi kalsium karbonat ((a). tanpa penambahan, (b) penambahan asam sitrat 5 ppm, (c) 10 ppm, (d) 20 ppm)

Gambar 4.6. merupakan hasil uji *Scanning Electron Microscopy*(SEM) kristal kalsium karbonat pada percobaan tiga variasi penambahan asam sitrat yaitu 5 ppm, 10 ppm dan 20 ppm, konsentrasi larutan 3000 ppm Ca^{2+} dengan pembesaran 3000 kali. Gambar (a), merupakan bentuk morfologi kerak hasil uji kristalisasi tanpa penambahan aditif asam sitrat. Pada gambar tersebut terlihat bahwa jenis kristal yang terbentuk adalah fasa kalsit. Kalsit memiliki bentuk kubus (*rhombohedral*). Gambar (b) merupakan hasil uji kristalisasi pada penambahan asam sitrat 5 ppm. Pada gambar tersebut terlihat bahwa fasa yang terbentuk adalah vaterit dengan bentuk bulat (*spherical*). Gambar (c) merupakan hasil uji kristalisasi pada penambahan asam sitrat 10 ppm.

Pada gambar tersebut terlihat fasa yang terbentuk adalah vaterit dengan bentuk bulat (*spherical*). Gambar (d) merupakan hasil uji kristalisasi pada penambahan asam sitrat 20 ppm. Pada gambar tersebut terlihat fasa yang terbentuk adalah vaterit dengan bentuk bulat (*spherical*) dengan ukuran lebih kecil (Han dkk., 2005; Mullin, 2004; Martos dkk., 2010).

Berdasarkan keempat hasil uji *Scanning Electron Microscopy* (SEM) tersebut menandakan bahwa penambahan aditif lebih besar mampu menekan pembentukan fasa kalsit yang merupakan jenis fasa *hardscale*. Apabila kristal ini terbentuk dan mengendap di dalam pipa maka akan menghasilkan kerak yang sulit untuk dibersihkan dari suatu sistem perpipaan. Sedangkan kedua jenis kristal lainnya, yaitu aragonite dan vaterite, merupakan jenis *softscale* yang lebih mudah dibersihkan apabila menempel pada dinding dalam pipa (Holysz dkk, 2007; Zhen dkk., 2010).

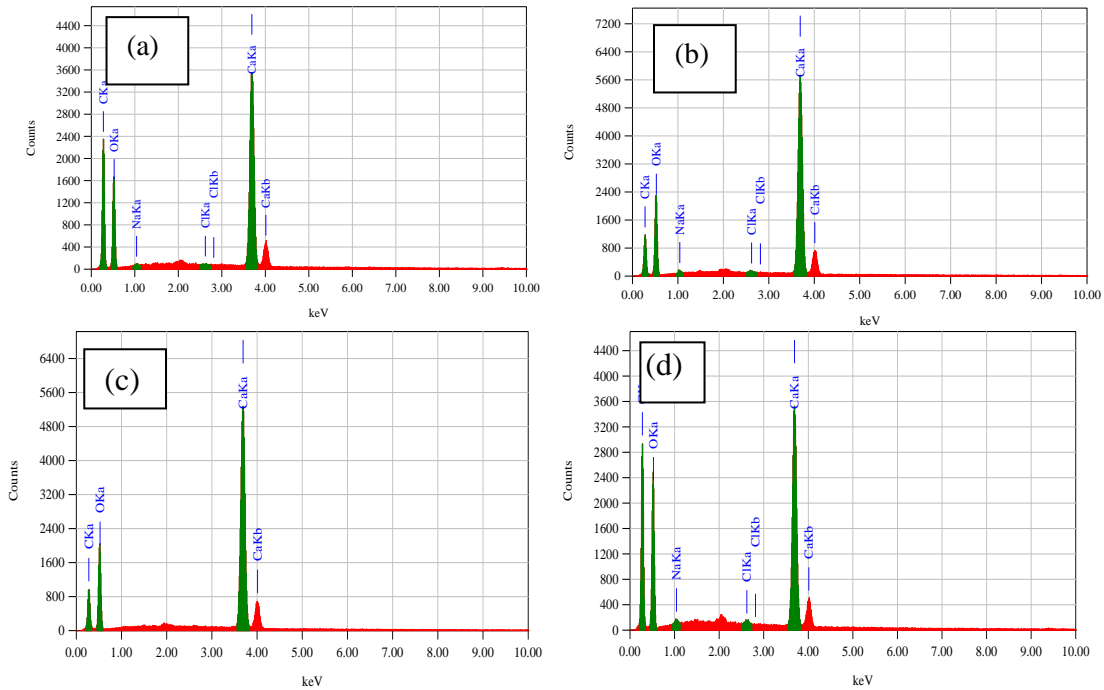
Hasil uji ini memberikan informasi yang sangat penting terhadap pengaruh penambahan aditif berupa asam sitrat. Sebab, dengan penambahan konsentrasi aditif lebih besar akan mencegah pertumbuhan fasa, dimana tanpa penggunaan aditif fasa yang terbentuk didominasi oleh fasa kalsit. Tetapi dengan penambahan aditif lebih besar terlihat bahwa fasa yang terbentuk selain kalsit, fasa aragonite dan vaterite juga terbentuk. Sehingga apabila fluida yang mengalir ke suatu sistem perpipaan, maka kemungkinan kerak yang terbentuk adalah jenis *softscale* yang mudah dihilangkan.

4.6.2 Hasil *Energy Disperse X-ray* (EDX)

Analisa mikro dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui bahwa kristal hasil percobaan adalah benar-benar kristal kalsium karbonat (CaCO_3). Pengujian ini meliputi pengujian komposisi kimia dan pengujian kemurnian. Untuk uji komposisi kimia digunakan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur yang ada dalam kristal meliputi nama unsur, presentase berat dan presentase atom. Alat yang digunakan untuk melakukan pengujian ini adalah SEM JEOL type JED – 2300 didukung *software Microanalyser* (Mahieux dkk., 2010).

Untuk mengetahui analisa mikro yang pertama kali dilakukan adalah menetapkan luar permukaan. Selanjutnya seluruh volume kristal yang berada di bawah permukaan di analisa. Dalam percobaan ini telah ditetapkan kristalisasi kalsium karbonat yang akan dianalisa yaitu kristal hasil percobaan pada tanpa penambahan, penambahan asam sitrat 5 ppm, 10 ppm dan 20 ppm. Pengujian dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro Semarang. Hasil dari analisa mikro yaitu dengan penambahan asam sitrat 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm dengan laju alir

30 ml/menit. Gambar kristal kalsium karbonat (Gambar 2.7) adalah ulasan dimana kristal akan dianalisa struktur mikro. Selanjutnya hasil analisa berupa grafik zat pembentukan dengan proporsi yang berada pada setiap elemen seperti dicantumkan pada Gambar 2.7 dan Tabel 2.4.



Gambar 4.7 Pengaruh aditif asam sitrat terhadap komposisi kalsium karbonat ((a). tanpa penambahan, (b) penambahan asam sitrat 5 ppm, (c) 10 ppm, (d) 20 ppm)

Tabel 4.4. Hasil analisa mikro kristal kalsium karbonat

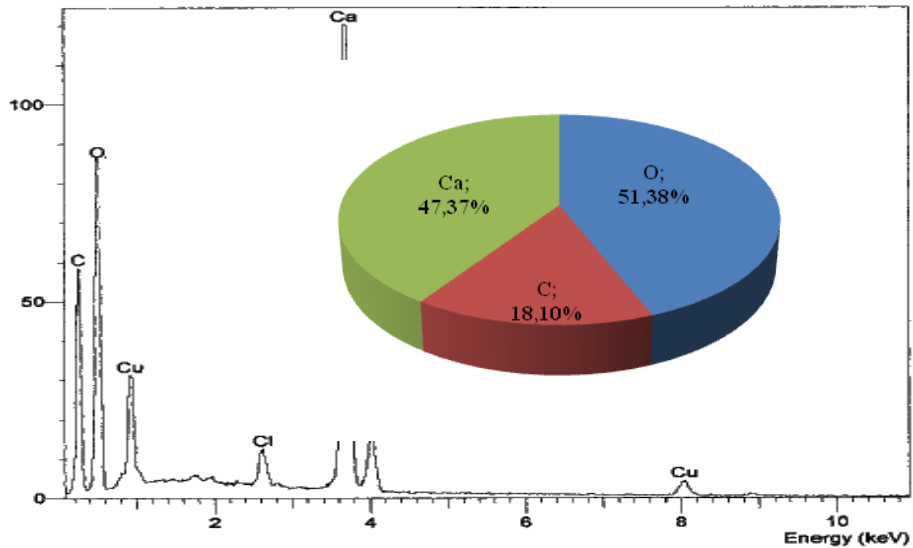
Element	<i>%massa (tanpa penambahan)</i>	<i>%massa (asam sitrat 5 ppm)</i>	<i>%massa (asam sitrat 10 ppm)</i>	<i>%massa (asam sitrat 20ppm)</i>
<i>CK</i>	32.72	59.33	34.50	64.40
<i>OK</i>	19.20	11.57	18.30	10.06
<i>CaK</i>	48.08	28.73	44.10	24.77

Hasil analisa mikro meliputi komposisi atom pembentuk kristal yang dinyatakan dalam presentase atom. Presentase diatas bila dibandingkan dengan hitungan secara teoritis ternyata mempunyai perbedaan.

Perbedaan hasil analisa mikro ini di akibatkan oleh beberapa sebab yaitu :

- Adanya penambahan zat aditif asam sitrat kedalam larutan sehingga proporsi CaCO_3 mengalami perubahan.
- Adanya kandungan natrium dan klorida dalam kristal sehingga berpengaruh komposisi kristal.

Untuk mengetahui kebenaran hasil mikro peneliti membandingkan dengan grafik analisa *Energy Disperse X-ray* (EDX) dari kristal CaCO_3 yang telah diteliti oleh Barbara dkk (1999). Hasil EDX yang dimaksud ditunjukkan yaitu pada Gambar 2.8.



Gambar 4.8. Analisa EDX CaCO_3 (Barbaradkk, 1999)

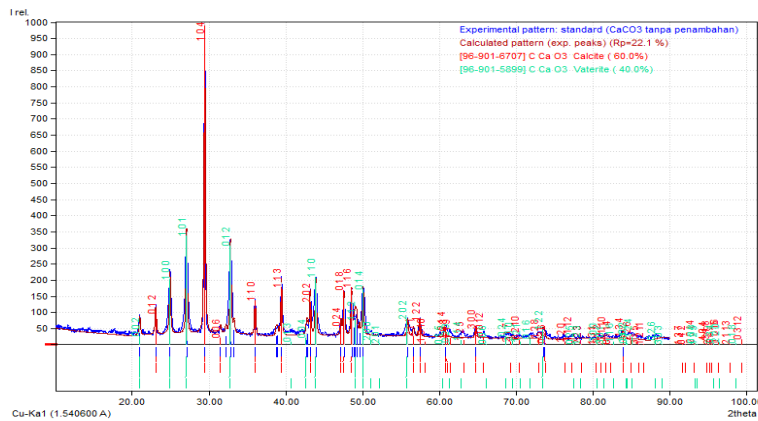
Tabel 4.5. Selisih antara teoritis dengan hasil analisa

Element	Teoritis Wt %	Analisa Mikro Wt%	Selisih Wt%
O	48	51.38	3,38 (lebih besar)
C	12	18.10	6,1 (lebih besar)
Ca	40	47.37	7,37 (lebih besar)

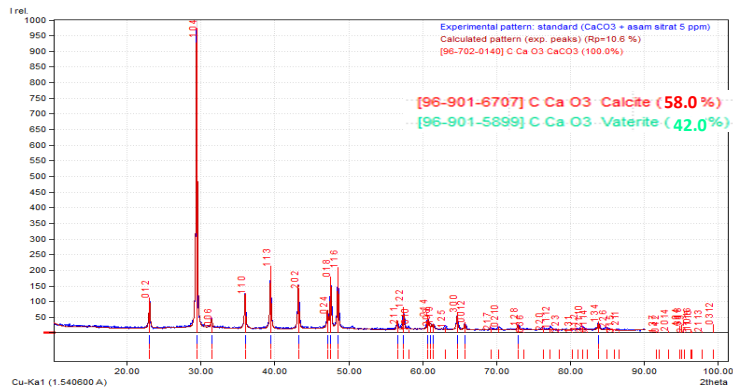
Hasil analisa menunjukan adanya perbedaan antara teoritis dengan analisa mikro yang dilakukan dengan alat *Scanning Electron Microscopy*(SEM)-*Energy Disperrse X-ray*(EDX), adapun perbedaan tesebut diakibatkan adanya kandungan-kandungan seperti: Cu dan Zn.

4.6.3 Hasil X-Ray Diffractometer (XRD) CaCO₃

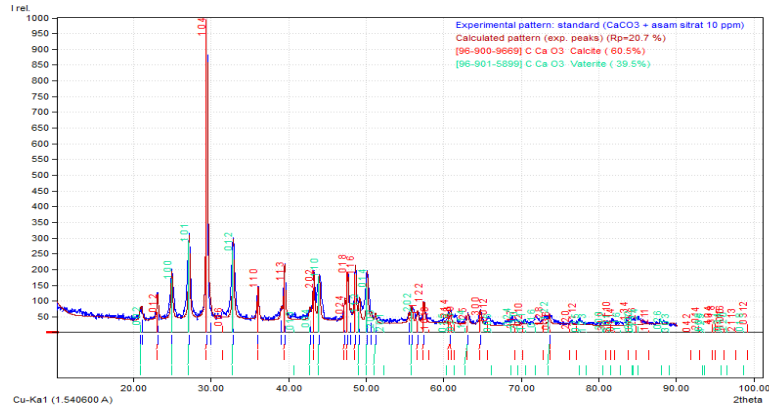
Analisa X-Ray Diffractometer (XRD) dilakukan dengan menggunakan alat X-Ray Diffractometer (XRD) dengan tegangan 40 kV dan arus 30 mA. Parameter scan pada sudut 2θ (10° – 80°).



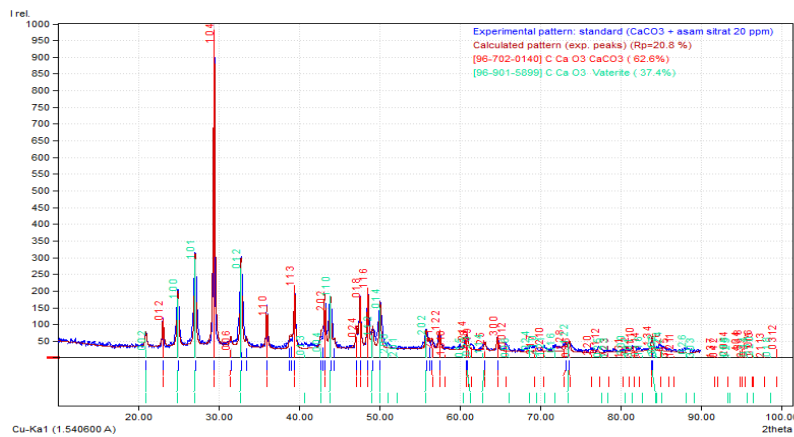
Gambar 4.9 Hasil X-Ray Diffractometer(XRD) CaCO₃



Gambar 4.10. X-Ray Diffractometer(XRD) penambahan asam sitrat 5 ppm

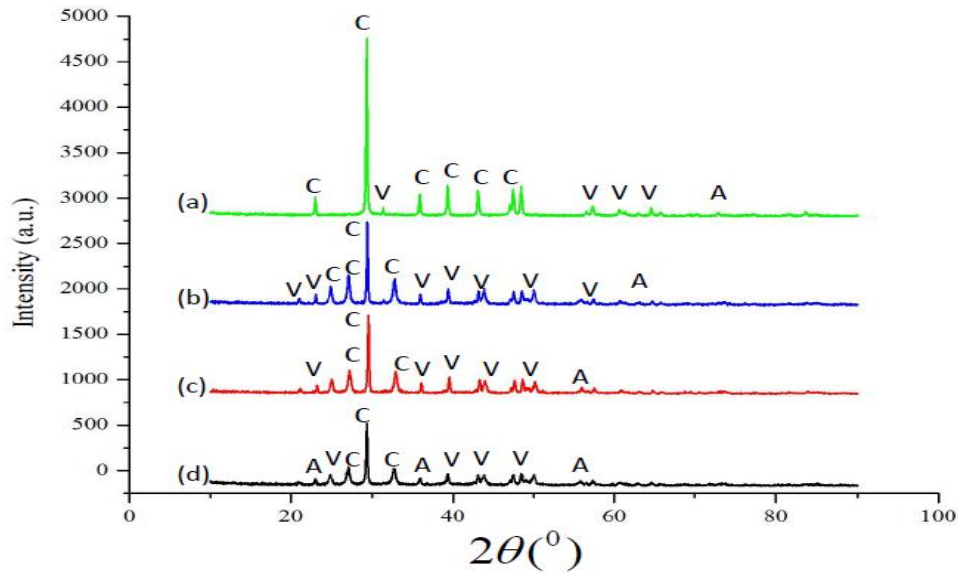


Gambar 4.11. *X-Ray Diffractometer*(XRD) penambahan 10 ppm



Gambar 4.12. *X-Ray Diffractometer*(XRD) penambahan asam sitrat 20 ppm

Dari ke empat data *X-Ray Diffractometer*(XRD) tersebut dapat digabung menjadi satu grafik sehingga dapat terlihat perbedaan antara *X-Ray Diffractometer* (XRD) CaCO_3 tanpa penambahan, dengan *X-Ray Diffractometer* (XRD) CaCO_3 dengan penambahan asam sitrat 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm.



Gambar 4.13 Data *X-Ray Diffractometer*(XRD) (a) Tanpa aditif, (b) aditif 5 ppm, (c) 10 ppm,(d) 20 ppm

Data hasil *X-Ray Diffractometer*(XRD) dari percobaan pada kecepatan 30 mL/menit dengan tanpa dan penambahan asam sitrat 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm ditunjukkan pada Gambar 2.13. Pada Gambar 4.13. menunjukkan fase calcite terbentuk pada intensitas tertinggi pada sudut 22, 23, 25, 32, 38, 42, 45⁰ 2θ, fase vaterit pada sudut 20, 58, 63, 74, 85⁰ 2θ and 16, 65, 72, 82⁰ 2θ terbaca di PDF. Analisis *Scanning Electron Microscopy*(SEM)/*Energy Dispersse X-ray*(EDX) menghasilkan unsurantara lain, Ca, C and O penyusun calcium karbonat. Kalsit merupakan fase yang paling stabil sedangkan vaterite merupakan fase metastabil (Muryanto dkk., 2014; Rodriguez, 2005).

BAB 5

ANALISA KINETIK NON-ISOTHERMAL KRISTAL CaCO_3 DALAM PIPA BERALIRAN LAMINAR

Gaya kinetik dalam pembentukan kerak mempengaruhi kecepatan terbentuknya kerak dimana kalau gaya kinetik rendah, maka pembentukan kerak cepat terjadi dan begitu juga sebaliknya. Pada bab ini penelitian menampilkan perhitungan besarnya gaya kinetik yang terjadi dan membuktikan rumus beserta hasil uji tersebut seperti rumus Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), Flynn-Wall-Ozawa (FWO), Tang, dan Straink.

5.1 Teori Gaya Kinetika

Kinetika kristalisasi CaCO_3 dapat dijelaskan oleh persamaan laju berikut (Vyazoskin, 2000):

$$d\alpha/dt = K(T) f(\alpha)$$

Keterangan:

K adalah konstanta laju reaksi tergantung suhu, $f(\alpha)$ adalah model reaksi, t adalah waktu.

Tetapi laju reaksi konstanta K diberikan oleh persamaan berikut :

$$K(T) = K_0 \exp. (-E_a / RT)$$

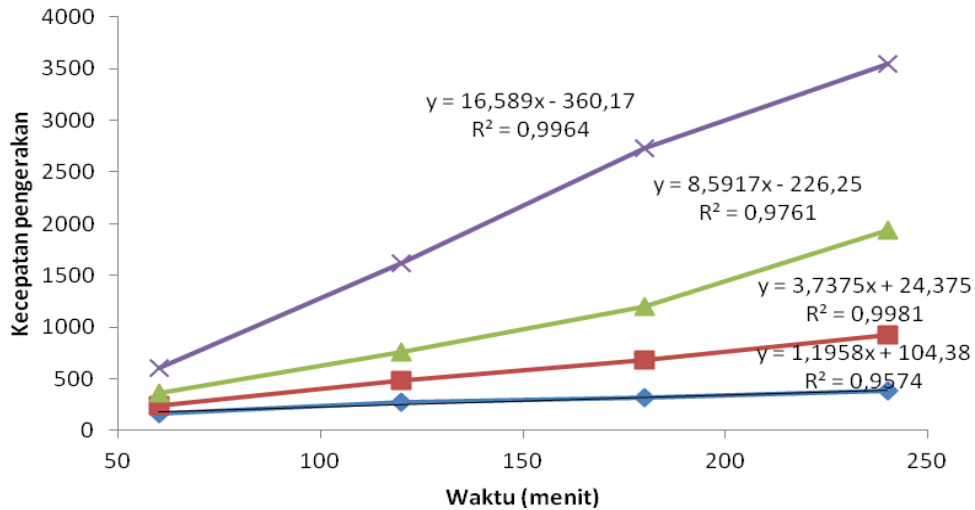
Keterangan:

K_0 adalah faktor pre-eksponensial laju konstan, E adalah energi aktivasi, T adalah suhu dan R bersifat universal gas konstan (Jankovic, 2008; Won et al, 2000; Heireche et al, 2007).

Gambar IV.36. menunjukkan pengaruh waktu pada tarif per waktu (min). grafik dapat diperoleh dari persamaan linear. Konstanta persamaan nilai dapat ditentukan dengan persamaan:

$$1/A \, dm/dt = kt + C$$

Data pengaruh suhu terhadap massa kerak, dapat ditentukan konstanta kecepatan reaksi. Data dm/dt terhadap waktu ditunjukkan pada grafik dibawah ini :



Gambar 5.1. Pengaruh waktu terhadap kecepatan pergerakan

Gambar 5.1 menunjukkan pengaruh waktu terhadap kecepatan per waktu. Dari Grafik tersebut dapat diperoleh persamaan linier (Patil, et al., 2011; Aboulkas and Harfi, 2008). Dari persamaan tersebut dapat ditentukan nilai konstanta berdasarkan persamaan :

$$\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = kt + C$$

Jad dapat diperoleh nilai konstanta laju reaksi (k) :

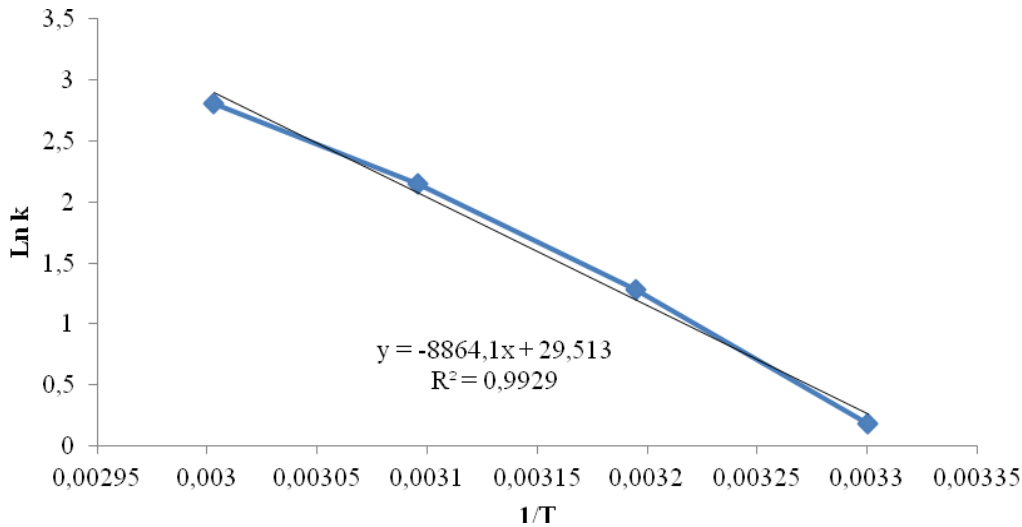
Tabel 5.1. Data persamaan linier

No	Suhu (°C)	Persamaan	k (x 10 ⁻³) J.mol ⁻¹ .K ⁻¹	kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
1	30	y = 1.195x + 104.3	1.195	1.195
2	40	y = 3.737x + 24.37	3.737	3.737
3	50	y = 8.591.x + 226.1	8.591	8.591
4	60	y = 16.58x + 360.1	16.58	16.58

Dari data nilai k menunjukkan kecepatan reaksi. Nilai k semakin besar, maka kecepatan reaksi pembentukan kerak akan semakin meningkat. Dari data tersebut menunjukkan semakin tinggi temperature membuat nilai tetapan kecepatan reaksi meningkat. Hal ini disebabkan suhu tinggi

membuat tekanan menjadi meningkat sehingga ion-ion reaktan akan bergerakcepat, tumbukan antar ion akan semakin banyak, akibatnya kerak yang terbentuk semakin banyak (Aboulkas and Harfi, 2008; Chiang et al., 2007; Vyazovkin and Dranca, 2006; Won et al., 2000; Zhijia et al., 2013).

Dari nilai k tersebut, dengan menggunakan persamaanArrhenius, dapat menentukan nilai Energi Aktivasi (E_a). Untuk menentukan nilai E_a dilakukan plot antara $\ln k$ sebagai sumbu y, dan $1/T$ sebagai sumbu x. Grafik antaraln k dan $1/T$ ditunjukkan pada Gambar 5.2



Gambar 5.2 Grafik hubungan $1/T$ terhadap $\ln k$

Dengan menggunakan persamaan Arrhenius : $\ln k = \ln A - E_a/R (1/T)$

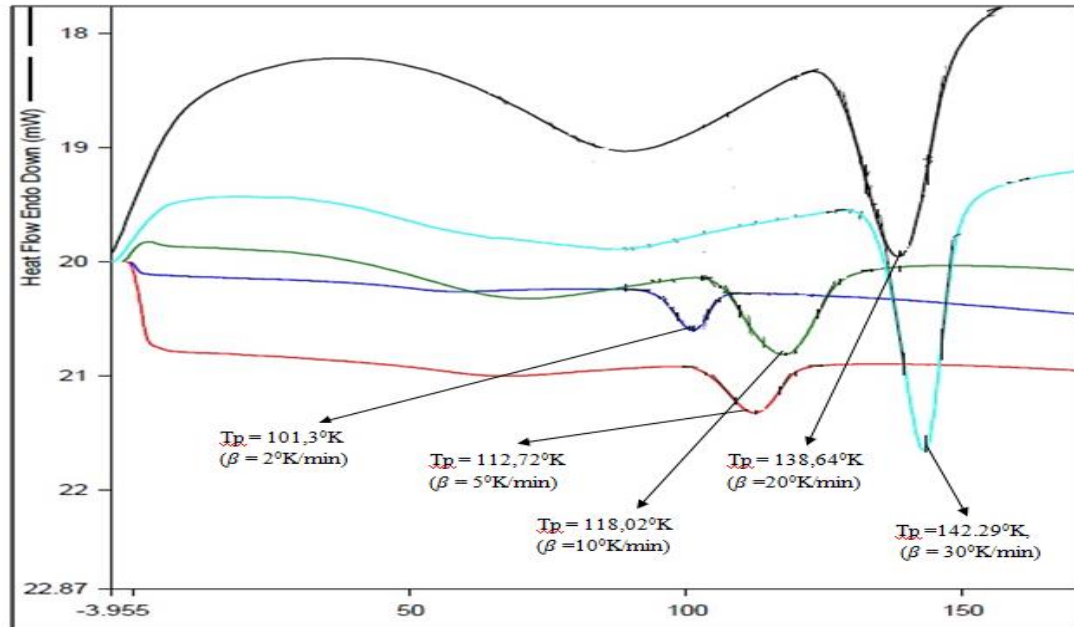
Jadi nilai $E_a = 8864 \times R = 8864 \times 8.314 = 73695 \text{ J.mol}^{-1} = 73.695 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Hasil ini dikonfirmasi dengan pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC)

5.2 Analisa Energi aktivasi dari hasil uji *Differential Scanning Calorimeter* (DSC)

Kinetika kristalisasi dari kerak CaCO_3 dipelajari menggunakan *Differential Scanning Calorimeter* (DSC) di tingkat pemanasan yang berbeda (2, 5, 10, 20 dan 30^0K/min) dalam kondisi non-isotermal. Empat metode iso-conversional (Kissinger-Akahira-Sunose, Flynn-Wall-Ozawa, Tang

dan Straink) digunakan untuk menentukan berbagai parameter kinetik: suhu kristalisasi (T_p), energi aktivasi kristalisasi (E_a),) dalam mode non-isotermal (Aboulkas and Harfi, 2008; Heireche and Belhadji, 2007; Indra and Kedar, 2013). Tahap pembentukan kristal dalam kerak CaCO_3 dianggap sebagai mekanisme reaksi. Hasil uji DSC dapat dilihat pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Thermograms *Differential Scanning Calorimeter* (DSC) dari kerak CaCO_3 pada tingkat pemanasan yang berbeda

Nilai-nilai T_p sesuai dengan β tercantum dalam Tabel 5.2. Dari Tabel 5.3 kita amati perubahan sistematis dalam T_p untuk suhu yang lebih tinggi dengan meningkatnya tingkat pemanasan.

Tabel 5.2. Nilai-nilai suhu di wilayah kristalisasi untuk kerak CaCO_3 pada tingkat pemanasan yang berbeda

No	β ($^{\circ}\text{K}/\text{min}$)	T_p ($^{\circ}\text{K}$)
1	2	101.3
2	5	112.72
3	10	118.02
4	20	138.64
5	30	142.29

Dalam kondisi non-isotermal dengan panas konstan tingkat $\beta = dT / dt$ dan menggunakan Persamaan (2), Persamaan (1) dapat ditulis sebagai:

$$d\alpha /dT = d\alpha /dt(1/\beta) = (K_0/\beta) \exp. (-E/RT)f(\alpha) \quad (3)$$

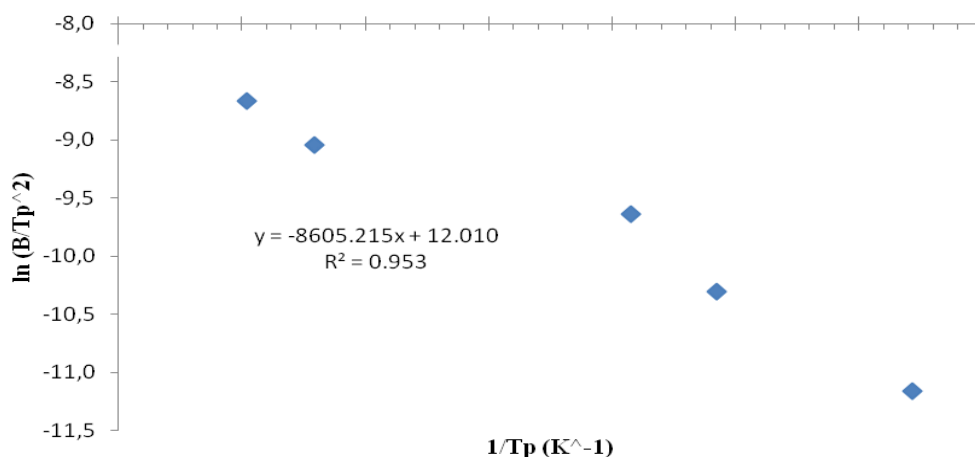
Ada berbagai model teoritis dan persamaan matematika untuk menjelaskan estimasi kinetika kristalisasi. Empat berikut iso-conversional methods telah digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis kinetika kristalisasi dari kerak CaCO_3 . Semua empat metode memerlukan penentuan T_p suhu dimana β tetap dari jumlah total berubah (Boonchom, 2009; Jankovic, 2008; Joraid, 2007; Liu et al., 2003; Peter et al., 2014; Vlaev et al., 2004; Wu et al., 2010).

5.3 Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) Method

Dalam metode KAS, hubungan antara temperature T_{pi} dan tingkat pemanasan β_i diberikan oleh (Kissinger, 1957; BurnhandanDinh, 2007);

$$\ln(\beta_i / T_p^2) = -E_a/RT_p + \text{Constant} \quad (4)$$

Subscript i menunjukkan tingkat pemanasan yang berbeda. Untuk setiap derajat dari α konversi, yang sesuai T_{pi} dan tingkat pemanasan yang digunakan. Grafik dari $\ln(\beta_i / T_p^2)$ vs $1 / T_{pi}$ untuk kerak CaCO_3 ditunjukkan pada Gambar 5.4. Dari lereng garis lurus yang diperoleh pada Gambar 5.4, kita telah mengevaluasi nilai E_a . nilai-nilai yang diperoleh dari E_a tercantum dalam Tabel 5.4.



Gambar 5.4. Grafik hubungan $\ln(\beta_i / T_p^2)$ dengan $1/T_{pi}$ kerak $\text{CaCO}_3\text{-CaSO}_4$

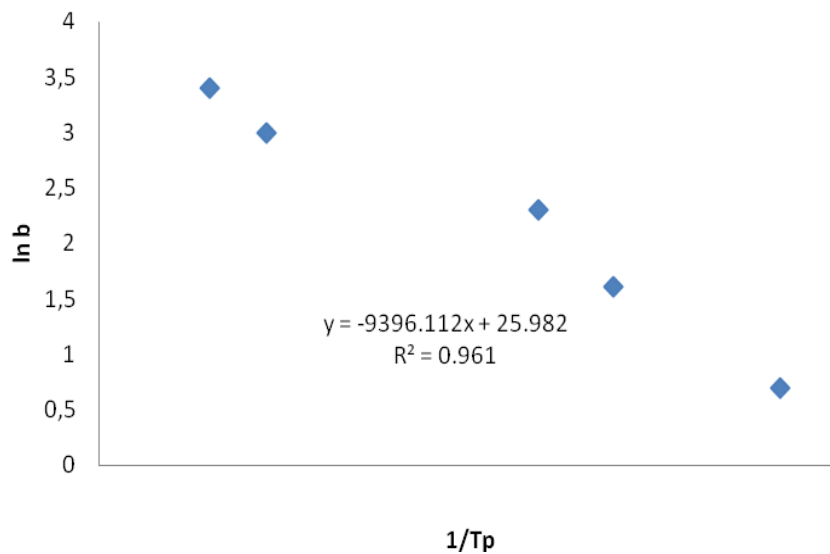
Grafik of $\ln(\beta_i / T_p^2)$ vs $1/T_{pi}$ kerak CaCO_3 menghasilkan persamaan $y = -8605.215X + 12.01$ dan $R^2 = 0.953$. Berdasarkan persamaan tersebut dihasilkan nilai $E_a = 71.543,76 \text{ J/mol} = 71,543 \text{ kJ/mol}$.

5.4 Flynn-Wall-Ozawa (FWO) Method

Dalam metode FWO, hubungan antara temperatur T_{pi} dan tingkat pemanasan β_i diberikan oleh (Brown dan Gallagher, 2008; Ozawa, 1971; Ozawa, 1965);

$$\ln(\beta_i) = -1.052(E_a/RT_p) + \text{Constant} \quad (5)$$

Grafik antara $\ln(\beta_i)$ versus $1/T_{pi}$ untuk kerak CaCO_3 ditunjukkan pada Gambar 5.5. Dari lereng garis lurus yang diperoleh pada Gambar 5.5, kami telah mengevaluasi nilai E_a . nilai-nilai yang diperoleh dari E_a tercantum dalam Tabel 5.2.



Gambar 5.5 Grafik hubungan antara $\ln(\beta_i)$ dengan $1/T_{pi}$ kerak CaCO_3

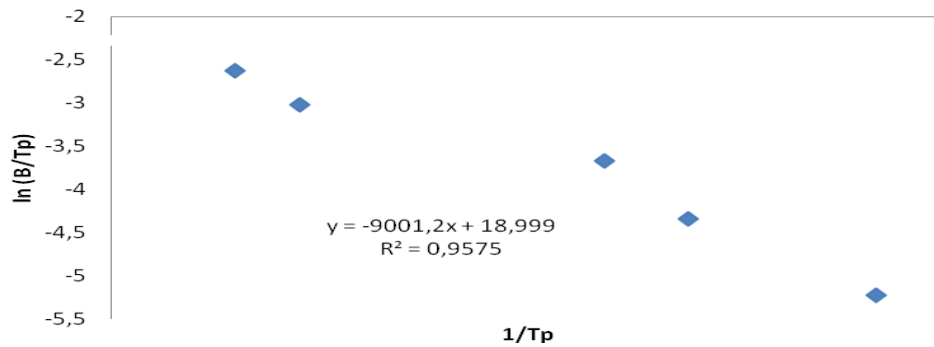
Grafik $\ln(\beta_i)$ versus $1/T_{pi}$ untuk kerak CaCO_3 menghasilkan persamaan $y = -9396.112X + 25.982$ dan $R^2 = 0.961$. Berdasarkan persamaan tersebut dihasilkan nilai $E_a = 74.257,87 \text{ J/mol} = 74,257 \text{ kJ/mol}$.

5.5 Tang Method

Dalam metode Tang (2005), hubungan antara temperatur T_{ai} dan tingkat pemanasan β_i diberikan oleh;

$$\ln(\beta_i/T_p) = -1.00145(E_a/RT_p) + Constant$$

Grafik dari $\ln(\beta_i/T_p)$ vs $1/T_{pi}$ untuk kerak CaCO_3 ditunjukkan pada Gambar 5.6. Dari lereng garis lurus yang diperoleh pada Gambar 5.6, kami telah mengevaluasi nilai E_a . nilai-nilai yang diperoleh dari E_a tercantum dalam Tabel 5.2.



Gambar 5.6. Grafik $\ln(\frac{\beta_i}{T_p})$ dan $1/T_{pi}$ kerak $\text{CaCO}_3\text{-CaSO}_4$

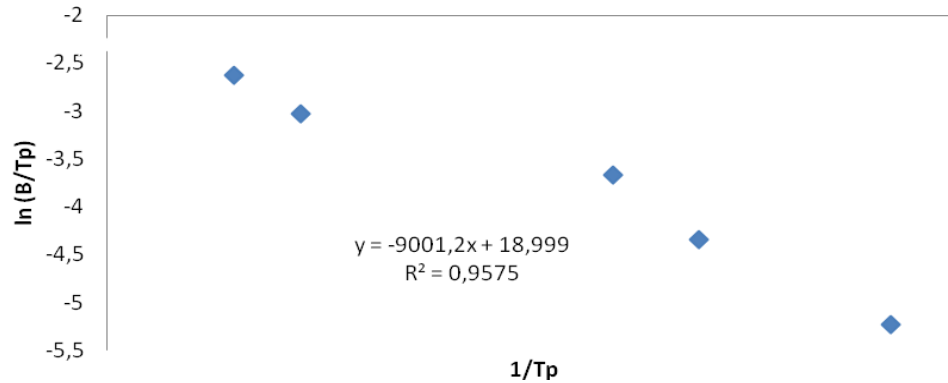
Grafik $\ln(\frac{\beta_i}{T_p})$ dengan $1/T_{pi}$ untuk kerak CaCO_3 menghasilkan persamaan $y = -9001.X + 18.99$ dan $R^2 = 0.957$. Berdasarkan persamaan tersebut dihasilkan nilai $E_a = 74.725,96 \text{ J/mol} = 74,725 \text{ kJ/mol}$.

5.6 Straink Method

Dalam metode Straink (2007), hubungan antara temperature T_{pi} dan tingkat pemanasan β_i diberikan oleh;

$$\ln(\beta_i/T_p) = -1.0008(E_a/RT_{pi}) + Constant \quad (7)$$

Grafik dari $\ln(\beta_i / T_p)$ vs $1 / T_{pi}$ untuk kerak CaCO_3 ditunjukkan pada Gambar 5.7 Dari lereng garis lurus yang diperoleh pada Gambar 5.7 kami telah mengevaluasi nilai E_a . nilai-nilai yang diperoleh dari E_a tercantum dalam Tabel 5.7.



Gambar 5.7. Grafik $\ln \left(\frac{\beta i}{T_p} \right)$ dan $1/T_p$ kerak CaCO_3

Grafik dari $\ln \left(\frac{\beta i}{T_p} \right)$ dengan $1/T_p$ untuk kerak CaCO_3 menghasilkan persamaan $y = -9001.X + 18.99$ dan $R^2 = 0.957$. Berdasarkan persamaan tersebut dihasilkan nilai $E_a = 74.774,49$ J/mol = 74,774 kJ/mol.

Tujuan menerapkan empat metode iso-conversional berbeda untuk evaluasi E_a adalah untuk memeriksa validitas dari empat metode. Nilai-nilai E_a diperoleh oleh empat metode dalam perjanjian yang baik. Ada sekitar evaluasi E_a oleh keempat metode. Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) metode ini kadang-kadang disebut metode Kissinger umum adalah salah satu metode iso-conversional terbaik (Marian et al., 2013). Hal ini jelas dari Tabel 8.3 bahwa energy aktivasi menunjukkan sedikit variasi dengan β_i dan T dalam empat metode ini.

Tabel 8.3. Nilai Energi aktivasi kristalisasi kerak CaCO_3 dengan perbedaan metode iso-conversional

No	Method	Persamaan	R2	Ea
1	Arrhenius	$y = -8864.x + 29.51$	0.992	73.695 kJ/mol
2	Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) Method	$y = -8605.215X + 12.01$	0.953	71,543 kJ/mol.
3	Flynn-Wall-Ozawa (FWO) Method	$y = -9396.112X + 25.982$	0.961	74,257 kJ/mol.
4	Tang Method	$y = -9001.X + 18.99$	0.957	74,725 kJ/mol.
5	Straink Method	$y = -9001.X + 18.99$	0.957	74,774 kJ/mol

ka nilai-nilai E_{α} independen dari β_i , proses kristalisasi didominasi oleh mekanisme reaksi (Boonchom, 2008); di sisilain, variasi besar E_{α} dengan β_i dapat dijelaskan dalam hal tahapan reaksi (Vlaev, 2004). Dari Tabel 4.20, terlihat bahwa nilai-nilai E_{α} pada fraksi mengkristal berbeda dievaluasi dengan empat metode isoconversional masing-masing. Jadi, proses kristalisasi dapat dianggap sebagai mekanisme reaksi. Variasi energy aktivasi dengan suhu menunjukkan bahwa tingkat kristalisasi sebenarnya ditentukan oleh tingkat dua proses; nukleasi dan difusi. Karena dua mekanisme ini cenderung memiliki energy aktivasi yang berbeda, energy aktivasi efektif transformasiakan berbeda dengan suhu (Dohredan Mehta, 2012). Penafsiran ini didasarkan pada teori nukleasi diusulkan oleh Fisher dan Turnbull (1949). Hal ini jelas dari ketergantungan suhu diamati dari energy aktivasi pada kerak CaCO_3 bahwa kristalisasi dapat dijelaskan oleh mekanisme reaksi.

BAB 6

PENUTUP

Bab ini memberikan kesimpulan yang diambil dari hasil dan pembahasan. Disamping itu, peneliti menyampaikan beberapa implikasi dan saran untuk peneliti selanjutnya.

6.1 Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan, semakin tinggi suhu, massa kerak yang dihasilkan semakin besar. Penambahan aditif berpengaruh terhadap pembentukan massa kerak. Semakin besar konsentrasi asam sitrat yang ditambahkan semakin kecil massa kerak yang terbentuk. Konduktivitas mengalami penurunan secara signifikan setelah waktu induksi. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan semakin banyak konsentrasi asam sitrat semakin lambat terbentuknya inti kerak yang terbentuk. Optimasi variabel dilakukan dengan menggunakan metode Respon Surface Methodology. Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa penambahan aditif juga berpengaruh terhadap perubahan morfologi kerak. Jenis kerak yang terbentuk adalah kalsit (*rombohedral*) bentuk kubus untuk tanpa penambahan aditif. Penambahan aditif didominasi dengan bentuk kerak vaterit bentuk bulat (*spherical*) dengan ukuran yang semakin kecil seiring meningkatnya konsentrasi asam sitrat yang ditunjukkan dari hasil *Scanning Electron Microscopy* (SEM)-EDS dan *X-Ray Diffractometer* (XRD). Perubahan morfologi dan fase Kristal kerak disebabkan aditif terabsorpsi pada permukaan kristal.

6.2 Implikasi Hasil Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian eksperimental yang hasilnya berupa data empiric tentang fenomena pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO_3) dan proses pengendalian terbentuknya kerak dengan penambahan aditif asam tartrat. Maka diharapkan akan memberikan manfaat pada umumnya bagi pengkajian dan pengembangan ilmu tentang kerak pada aspek proses pembentukan dan pengendaliannya baik kerak dilingkungan sehari-hari maupun kerak yang muncul dalam industri, khususnya bagi para operator industri yang terkait dengan bidang kerak (seperti *boiler*, *cooling tower* dan *heat exchanger*) bias mendapatkan tambahan sumber

informasi dalam menjalankan tugasnya. Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan bisa memberikan suatu data atau informasi bagaimana cara pengaturan parameter yang berpengaruh terhadap pertumbuhan kerak sehingga sistem kerja akan mempunyai efisiensi yang lebih tinggi. Proses aliran bisa berjalan tanpa ada gangguan dari kerak yang timbul, proses *heat transfer* tidak terhambat oleh kerak yang menempel pada dinding bejana.

6.3 Saran-saran

Penelitian kerak CaCO_3 dapat dilakukan kembali dengan alat penelitian yang sama melalui mengubah parameternya seperti material sampel (*stemless steel*, *polipropilin*, kuningan, dll), penggunaan aditif yang berbeda (asamphospat, asamkromat, atau dengan ion Mg, Cu, dll) , dengan jenis aliran turbulen, Penelitian untuk jenis kerak yang lain (sepertikerak barium sulfat, strontium sulfat dan mineral fosfat yang lain) dapat dilakukan menggunakan alat ukur laser ultra untuk mengetahui propagasi perambatan kerak.

DAFTAR PUSTAKA

- Alimi, F., Tlili, M., Amor, M.B., Gabrielli, C., Maurin, G. (2007), *Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation*, Desalination, 206, 163-168.
- Amor, M. B., Zgolli, D., Tlili, M. M., Manzola, A. S. (2004). *Influence of water hardness, substrate nature and temperature on heterogeneous calcium carbonate nucleation*. Desalination, 166, 79 - 84.
- Antony, A., Low, J. H., Gray, S., Childress, A. E., Le-Clech, P., Leslie, G. (2011). *Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review*. Journal of Membrane Science, 383, 1 - 16.
- Asnawati., (2001). *Pengaruh temperatur terhadap reaksi fosfonat dalam inhibitor kerak pada sumur minyak*. Jurnal Ilmu Dasar, Vol.2. No.1, Hal.20-26.
- Association World Congress on Desalination and Water Reuse/ Tianjen China, pp.13-119.
- Bott, T.R., (1995), *Fouling of Heat Exchangers*, Elsevier, Amsterdam and New York.
- Chen, T., Neville, A., Yuan, M. (2004), *Assessing the effect of Mg²⁺ on CaCO₃ scale formation-bulk precipitation and surface deposition*, Journal Of Crystal Growth, 275, e1341 - e1347.
- Crabtree, M., Eslinger, D., Fletcher, P., Miller, M., Johnson, A., King, G. (1999). *Fighting scale removal and prevention*. Oilfield Review, 11(3), pp.30-45.
- Fathi, A., Mohamed, T., Claude, G., Maurin, G., Mohamed, B. A. (2006). Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate. *Water Research*, 40(10), 1941-1950.
- Garcia, C., Courbin, G., Ropital, F., Fiaud, C. (2001), *Study of the scale inhibition by HEDP in a channel flow cell using a quartz crystal microbalance*, Electrochimica Acta, 46, pp: 973-985.
- Glade, H., Krömer, K., Stärk, A., Loisel, K., Odier, K., Nied, S., Essig, M. (2013). *Effects Of Tube material on skala formation and control in multiple effect distillers*. Prociding of International Desalination

- Han, Y. S., Hadiko, G., Fuji, M., & Takahashi, M. (2005). *Effect of flow rate and CO₂ content on the phase and morphology of CaCO₃ prepared by bubbling method*. Journal of Crystal Growth, 276(3), 541-548.
- Hadiko, G., Han, Y. S., Fuji, M., Takahashi, M. (2005). *Synthesis of hollow calcium carbonate particles by the bubble templating method*. Materials Letters, 59(19), 2519-2522.
- Holysz, L., Szczes, A., Chibowski, E. (2007). *Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions*. Journal of Colloid and Interface Science, 316(2), 996-1002.
- Isopescu, R., Mateescu, C., Mihai, M., Dabija, G. (2010). *The effects of organic additives on induction time and characteristics of precipitated calcium carbonate*. Chemical Engineering Research and Design, 88, 1450-1454.
- Kiaei, Z., Haghtalab, A. (2014). *Experimental study of using Ca-DTPMP nanoparticles in inhibition of CaCO₃ scaling in a bulk water process*, Desalination, 33, 84 - 92.
- Martos, C., Coto, B., Pena, J., L., Rodriguez, R., Merino-Garcia, D., Pastor, G. (2010), *Effect of Precipitation and detection technique on particle size distribution of CaCO₃*, Elsevier B.V.
- Mao, Z., Huang, J. (2007), *Habit modification of calcium carbonate in the presence of malic acid*, Journal of Solid State Chemistry, 180, 453 – 460.
- Martinod, A., Euvrard, M., Foissy, A., Neville, A. (2007), *Progressing the understanding of chemical inhibition of mineral scale by green inhibitors*, Desalination, 220, 345-352.
- Ma'mun, H., Bayuseno, A. P., Muryanto, S. (2013). *Pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO₃) di dalam pipa beraliran laminar pada laju alir 30 ml/menit hingga 50 ml/menit dan penambahan aditif asam malat*. In Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Fakultas Teknik (Vol. 1, No. 1).
- Muryanto, S., Bayuseno, A.P., Sediono, W., Mangestiyono, W. (2012). *Development of a versatile laboratory project for skala formation and control*. Education for Chemical Engineers, 7, 78 - 84.

- Muryanto, S., Bayuseno, A. P., Ma'mun, H., Usamah, M. (2014). *Calcium carbonate scale formation in pipes: effect of flow rates, temperature, and malic acid as additives on the mass and morphology of the scale*. *Procedia Chemistry*, 9, 69 - 76.
- Plavsic, B., Kobe, S., Orel, B (1999). Identification of crystallization forms of CaCO_3 with FTIR spectroscopy, ISSN 1318 - 0010, *KZLTET*, 33, (6), 517.
- Ratna, P., S. (2011), *Studi Penanggulangan Problem Scale Dari Near-Wellbore Hingga Flowline di Lapangan Minyak Limau*, Fakultas Teknik UI, Depok.
- Reddy, M.M., Hoch, A.R. (2001). *Calcite crystal growth rate inhibition by polycarboxylic acids*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 235(2), pp.365-370.
- Saksono, N., Mubarak, M. H., Widaningrum, R., Bismo, S. (2007). *Pengaruh Medan Magnet terhadap Konduktivitas Larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta Presipitasi dan Morfologi Partikel CaCO_3 pada Sistem Fluida Statis*. *Jurnal Teknologi*, 318-323.
- Sediono, W., Bayuseno, A. P., Muryanto, S. (2011). *Eksperimen Pembentukan Kerak Gypsum Dengan Konsentrasi Ca^{2+} : 3500 Ppm Dan Aditif Fe^{2+}* . *Momentum*, 7(2).
- Setta, F. A., Neville, A. (2011). *Efficiency assessment of inhibitors on CaCO_3 precipitation kinetics in the bulk and deposition on a stainless steel surface (316L)*. *Desalination*, 281, 340-347.
- Sousa, M.F., Bertran, C.A. (2014). *New methodology based on static light scattering measurements for evaluation of inhibitors for in bulk crystallization*. *Journal of Colloid and Interface Science*. Pp.57-64.
- Singh, N.B., Middendorf, B. (2007), *Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization*, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 53, 57 - 77.
- Siswoyo, Erna, K. (2005), *Identifikasi Pembentukan Scale*, Jurusan Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Mineral, UPN Veteran Yogyakarta.
- Tijing, L.D., Lee, D.H., Kim, D.W., Cho, Y.I., Kim, C.S. (2011). *Effect of high-frequency electric fields on calcium carbonate scaling*. *Desalination*, 279, 47-53.

- Tzotzi, C., Pahiadaki, T., Yiantsios, S.G., Karabelas, A.J., Andritsos, N. (2007). *A study of CaCO₃ skala formation and inhibition in RO and NF membrane processes*. Journal of Membrane Science, 296(1), pp.171-184.
- Wang, Y., Moo, Y. X., Chen, C., Gunawan, P., & Xu, R. (2010). *Fast precipitation of uniform CaCO₃nanospheres and their transformation to hollow hydroxyapatite nanospheres*. Journal of colloid and interface science, 352(2), 393-400.
- Wada, N., Kanamura, K., Umegaki, T. (2001). *Effects of carboxylic acids on the crystallization of calcium carbonate*. Journal of colloid and interface science, 233(1), 65-72.
- Wu, Z., Davidson, J.H., Francis, L.F. (2010). Effect of water chemistry on calcium carbonate deposition on metal and polymer surfaces. *Journal of colloid and interface science*, 343(1), 176-187.
- Tang, Y., Zhang, F., Cao, Z., Jing, W., Chen, Y. (2012). *Crystallization of CaCO₃ in the presence of sulfate and additives: Experimental and molecular dynamics simulation studies*. Journal of colloid and interface science, 377, 430 - 437.



Dr. techn. Samsudi Raharjo MT. MM. born in Yogyakarta on May 17, 1960. He achieved Bachelor degree at Faculty of Engineering Muhammadiyah University. He also achieved his bachelor degree from FKT IKIP Semarang, Master of Engineering in Diponegoro University and Doctor techn. from Diponegoro University, Semarang. Several researches have been conducted i.e :

Google Scholar :

1. Pengaruh Variasi Tegangan Listrik Dan Waktu Proses Electroplating Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah Dengan Krom
2. Analisa Pengaruh Pengecoran Ulang Terhadap Sifat Mekanik Paduan Alumunium Adc 12
3. Pengaruh Variasi Tegangan Listrik Dan Waktu Proses Electroplating Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Baja Karbon
4. Pengaruh Variasi Tegangan Listrik Dan Waktu Proses Elektroplating Terhadap Ketebalan Serta Kekerasan Lapisan Pada Baja Karbon Rendah Dengan Krom
5. Pengaruh Perlakuan Alkali Terhadap Kekuatan Tarik Bahan Komposit Serat Rambut Manusia
6. Analisis Hasil Produk Alat Pertanian Menggunakan Tungku Pack Kaburising Dengan Tungku Konvensional. Traksi. Vol. 5. No. 1
7. Pembuatan Briket Bioarang Dari Limbah Abu Ketel, Jarak Dan Gliserin
8. Efektifitas Penggunaan Musicool Pada Mesin Ac
9. Anatisa Performa Mesin Pendingin Dengan Menggunakan Musicool Hydrocarbon Refrigerant Dari Kilang Migas, Simposium Nasional Rapi Ix 2010
10. Model Dan Optimasi Variabel Suhu Pembentukan Kerak Caco3 Pada Pipa Beraliran Laminer

Scopus

1. Calcium carbonate scale formation in copper pipes on laminar flow
2. Modeling and optimization of CaCO₃ precipitated from laminar-flow water in the presence of citric acid
3. Optimization of calcium sulfate precipitated in the laminar flow pipe through response surface model
4. Controlling of magnesium carbonate scale deposition on the piping system with laminar flow
5. Calcium carbonate scale on pipes: Analysis of kinetic, mass, polymorphism, morphology
6. Controlling of Calcium Carbonate Scale Deposition on the Piping System with Laminar Flow
7. Optimization and Controlling of FeCO₃ Scale Deposition on the Piping System with Laminar Flow

REPUBLIC INDONESIA
KEMENTERIAN HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA

SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan : EC00202012831, 16 April 2020

Pencipta

Nama : **Dr.techn. Samsudi Raharjo, MT, MM.**

Alamat : Jl. Amposari Timur I RT 05 RW 03 No. 26, Kelurahan Kedungmundu, Kecamatan Tembalang, Kota Semarang, Semarang, Jawa Tengah, 50273

Kewarganegaraan : Indonesia

Pemegang Hak Cipta

Nama : **Universitas Muhammadiyah Semarang (Unimus)**

Alamat : Jl. Kedungmundu Raya No. 18, Kelurahan Kedungmundu, Kecamatan Tembalang, Kota Semarang, Semarang, Jawa Tengah, 50273

Kewarganegaraan : Indonesia

Jenis Ciptaan : **Buku**

Judul Ciptaan : **Buku Referensi : Pembentukan Dan Pengendalian Kerak Calcium Carbonate Di Dalam Pipa Beraliran Laminar**

Tanggal dan tempat diumumkan untuk pertama kali di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia : 6 April 2020, di Semarang

Jangka waktu perlindungan : Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak Ciptaan tersebut pertama kali dilakukan Pengumuman.

Nomor pencatatan : 000185361

adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.

Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.



a.n. MENTERI HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA
DIREKTUR JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL

Dr. Freddy Harris, S.H., LL.M., ACCS.
NIP. 196611181994031001